



Universidad
Carlos III de Madrid

DETERMINACIÓN DE LA TASA DE REACCIÓN Y
DE LA ENERGÍA DE ACTIVACIÓN EN LOS
PROCESOS DE ENVEJECIMIENTO DE PAPELES
AISLANTES IMPREGNADOS EN ACEITES
MINERALES

GRADO EN INGENIERÍA ELÉCTRICA

Autor: Miguel Ángel Jiménez Mayor

Tutor: María Belén García de Burgos

Juan Carlos Burgos Díaz

Índice:

ABSTRACT	9
CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN.....	10
1.2 OBJETIVO	12
1.3 ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO	13
CAPÍTULO 2: EL TRANSFORMADOR DE POTENCIA	15
2.1 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO	15
2.2 NÚCLEO MAGNÉTICO	16
2.3 DEVANADOS	19
2.4 SISTEMA DE REFRIGERACIÓN	23
2.4.1 El aceite mineral	23
2.4.2 Designación del sistema de refrigeración	25
2.5 LA CUBA	26
2.6 SISTEMA DE AISLAMIENTO	27
CAPÍTULO 3: ENVEJECIMIENTO DEL AISLAMIENTO SÓLIDO.....	30
3.1 COMPOSICIÓN DEL PAPEL AISLANTE.....	30
3.2 ENVEJECIMIENTO DEL PAPEL AISLANTE	31
3.2.1 Oxidación	32
3.2.2 Hidrólisis	33
3.2.3 Pirólisis.....	34
3.3 VIDA DEL TRANSFORMADOR DE POTENCIA Y VIDA DE SU AISLAMIENTO.....	34
3.3.1 Punto final de vida del transformador	35
3.3.2 Punto final de vida del aislamiento	35
CAPÍTULO 4: MODELOS DE PÉRDIDA DE VIDA DEL TRANSFORMADOR DE POTENCIA.	
.....	37
4.1 GUÍAS DE CARGA	37
4.1.1 Modelo de Arrhenius-Dakin	37
4.1.2 Modelo de Montsinger	39
4.2 OBTENCIÓN DEL DP DE MANERA DIRECTA	41
4.2.1 Modelo de Emsley	41
4.3 DETERMINACIÓN DE LOS PARAMETROS	43

4.4 ESTUDIOS DE LELEKAKIS	44
4.4.1 Estudios para baja concentración de oxígeno.....	44
4.4.1.1 Evolución del contenido del agua en el papel.....	45
4.4.1.2 Cálculo de la tasa de envejecimiento (k).....	48
4.4.1.3 Cálculo de las energías de activación	49
4.4.1.4 Cálculo de los valores de A	50
4.4.1.5 Dependencia del valor A con la cantidad de oxígeno en el aceite.....	51
4.4.1.6 Curvas de vida para un contenido de oxígeno bajo	52
4.4.1.7 Conclusiones.....	54
4.4.2 Estudios para media y alta concentración de oxígeno.....	55
4.4.2.1 Conclusiones.....	62
CAPÍTULO 5: PROGRAMA DESARROLLADO.....	63
5.1 DATOS DEL PROGRAMA DESARROLLADO	64
5.2 ENTRADA DE DATOS AL PROGRAMA.....	66
5.3 EJECUTABLE MATLAB	67
5.3.1 Módulo Principal	67
5.3.2 Módulo CargarDatos	68
5.3.3 Módulo MaxMinMed	71
5.3.4 Módulo OrdenaAjuste	72
5.3.4.1 Módulo CrearAjuste	76
5.3.5 Módulo AjusteA.....	78
5.3.5.1 Módulo CrearAjusteA.....	81
5.3.6 Módulo AjusteK	82
5.3.6.1 Módulo CrearAjusteK	88
5.3.6.2 Módulo CrearAjusteEa	88
CAPÍTULO 6: RESULTADOS	90
6.1 RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE ENVEJECIMIENTO	90
6.2 AJUSTE DE LOS RESULTADOS DE LOS ENSAYOS AL MODELO DE EMSLEY.....	93
6.3 EVOLUCIÓN DE LOS VALORES DE A CON LA HUMEDAD	97
6.3.1 Evolución de los valores de A con la humedad, obtenida a partir de los ensayos realizados por la Universidad Carlos III	97
6.3.2 Ensayos de envejecimiento realizados con un contenido de oxígeno bajo..	99

6.3.3 Ensayos de envejecimiento realizados con un contenido de oxígeno medio	103
6.4 EVOLUCIÓN DEL $\ln(K)$ FRENTE A $1/T$. OBTENCIÓN DE LA ENERGÍA DE ACTIVACIÓN.....	105
6.4.1 Evolución de la energía de activación con la humedad	107
6.5 MODELO DE ENVEJECIMIENTO OBTENIDO	107
CAPÍTULO 7: CONCLUSIONES	109
7.1 RESUMEN.....	109
7.2 CONCLUSIONES.....	110
7.3 TRABAJOS FUTUROS	111
BIBLIOGRAFÍA	113

Índice de figuras:

Figura 1: Partes de un sistema de potencia de suministro eléctrico.	10
Figura 2: Esquema de funcionamiento de un transformador.....	15
Figura 3: Transformador.....	16
Figura 4: Chapas formando el núcleo magnético.....	17
Figura 5: Bobina y chapas del núcleo magnético.	17
Figura 6: Núcleo de tipo columna.	19
Figura 7: Núcleo acorazado.	19
Figura 8: Arrollamientos en capas.....	21
Figura 9: Arrollamiento helicoidal.....	22
Figura 10: Arrollamiento en disco (izquierda) y conexión en serie de los discos (derecha).....	22
Figura 11: Estructura de los hidrocarburos del aceite mineral.	24
Figura 12: Circulación de aceite forzada.	25
Figura 13: Circulación de aceite dirigida.	25
Figura 14: Cuba de un transformador.	26
Figura 15: Transformador de distribución de llenado integral.	26
Figura 16: Transformador de potencia con depósito de expansión.	27
Figura 17: Aislamiento sólido de un transformador.....	29
Figura 18: Estructura de la celulosa [12].	30
Figura 19: Estructura de la lignina.	31
Figura 20: Oxidación del aceite mineral para formar ácidos carboxílicos.	32
Figura 21: Esquema de la hidrólisis ácida de la celulosa.....	33
Figura 22: Evolución de la rigidez mecánica en función del grado de polimerización [12].....	36

Figura 23: Reacción predominante en función de la inversa de la temperatura [12]. .	38
Figura 24: Faa (IEEE) Y V (IEC) en función de la temperatura del punto caliente.	40
Figura 25: Evolución del DP del papel Kraft para diferentes niveles de temperatura y de humedad.....	46
Figura 26: Evolución del contenido de agua para un con porcentaje de 0,5% de agua inicial, a 140°C y en baja concentración de oxígeno.	46
Figura 27: Evolución del contenido de agua para un porcentaje de 1,6% de agua inicial, a 120 °C y en baja concentración de oxígeno.	47
Figura 28: Evolución del contenido de agua para un porcentaje de 2,7% de agua inicial, a 120°C y en baja concentración de oxígeno.	47
Figura 29: Evolución del oxígeno en el aceite.	48
Figura 30: (1DPt-1DP0) frente al tiempo para papel Kraft.	49
Figura 31: Tasa de envejecimiento (k) en función de la inversa del tiempo para papel Kraft.	49
Figura 32: Comparativa de los valores de A obtenido por Emsley, Lundgaard y el equipo de Lelekakis (Monash).	50
Figura 33: Valores de A frente a la humedad, obtenidos por Emsley, Lundgaard y Monash.	51
Figura 34: Valores de A frente a la humedad, obtenidos por Emsley, Lundgaard y Monash ($A_{\text{ajuste}} R^2=1$).	52
Figura 35: Curvas de vida para papel Kraft para baja concentración de oxígeno combinando los valores de A de Emsley y Lundgaard.	53
Figura 36: Curvas de vida para papel Kraft para baja concentración de oxígeno combinando los valores de A de Emsley, Lundgaard y Monash.	53
Figura 37: Evolución del DP para papel Kraft para una concentración de oxígeno media (7000-14000 ppm).	55
Figura 38: Evolución del DP para papel Kraft para una concentración de oxígeno alta (16500-25000 ppm).	55
Figura 39: (1DPt-1DP0) frente al tiempo para papel Kraft para una concentración de oxígeno media (7000-14000 ppm).	57
Figura 40: (1DPt-1DP0) frente al tiempo para papel Kraft para una concentración de oxígeno alta (16500-25000 ppm).	57
Figura 41: Tasa de envejecimiento (k) en función de la inversa del tiempo para papel Kraft con contenido de oxígeno medio. Figura modificada del texto original [6].	59
Figura 42: Tasa de envejecimiento (k) en función de la inversa del tiempo para papel Kraft con contenido de oxígeno alto.	59
Figura 43: Valores de A para papel Kraft en bajo, medio y alto contenido de oxígeno frente a la humedad.	60
Figura 44: Curvas de vida para papel Kraft con contenido medio en oxígeno obtenidas utilizando los valores de A obtenidos por Lelekakis.....	61

Figura 45: Curvas de vida para papel Kraft con contenido alto en oxígeno obtenidas utilizando los valores de A obtenidos por Lelekakis.....	61
Figura 46: Comparación de la esperanza de vida del papel Kraft con una concentración de agua de 1,6% para bajo, medio y alto concentración de oxígeno.	61
Figura 47: Colocación de los viales para una temperatura de ensayo de 120°C.....	64
Figura 48: Colocación de los viales para una temperatura de ensayo de 120°C vista desde arriba.....	65
Figura 49: Hoja Excel “Datos” de almacenamiento de los resultados de los ensayos de envejecimiento.....	65
Figura 50: Hoja Excel “Plantilla” del almacenamiento de los resultados de los ensayos de envejecimiento.	66
Figura 51: Módulos que componen el ejecutable de Matlab.	67
Figura 52: Opciones del programa.	68
Figura 53: Código Matlab del bucle while y la sentencia if, programado en el módulo Principal.	68
Figura 54: Código Matlab referente a la función uigetfile.	69
Figura 55: Selección de la hoja Excel de almacenamiento de los resultados de los ensayos de envejecimiento.	69
Figura 56: Código Matlab que detiene la ejecución en caso de pulsar cancelar.	69
Figura 57: Introducción del rango de la hoja Excel.	70
Figura 58: Estructura “Ensayo”.....	70
Figura 59: Estructura “Datos”.....	70
Figura 60: Introducción del tipo de ensayo para el que se desea obtener los valores máximo, mínimo y mediana de la tasa de envejecimiento (k).	71
Figura 61: Código Matlab referente al cálculo de los valores máximo, mínimo y la mediana de la tasa de envejecimiento para cada ensayo.....	72
Figura 62: Introducción del tipo de ensayo para el que se desea hacer el ajuste.	72
Figura 63: Código Matlab referente a los dos bucles while y la sentencia if.	73
Figura 64: Estructura fitresult y gof.	74
Figura 65: Código Matlab correspondiente al almacenamiento de los resultados de los ajustes en la estructura datos.	74
Figura 66: Ajuste de la curva de la evolución de (1DPt-1DP0) frente al tiempo en horas para una temperatura de 130°C y una humedad de 1,01%.....	74
Figura 67: Ecuación que describe la evolución, los coeficientes (p1 y p2) de la misma, los parámetros que indican la bondad del ajuste: La suma de los cuadrados de los errores(SSE), el coeficiente de determinación(R-cuadrado) y el error cuadrático medio(RMSE); y los valores de k y de A calculados a partir del ajuste.	75
Figura 68: Código Matlab correspondiente a la opción que permite eliminar puntos del ensayo seleccionado.....	76
Figura 69: Introducción del punto a eliminar.....	76
Figura 70: Ventana inicial de la herramienta cftool.	77

Figura 71: Secuencia indicando la ruta para generar el código de Matlab correspondiente al ajuste.....	77
Figura 72: Código Matlab correspondiente al módulo CrearAjuste.	78
Figura 73: Indicativo del programa cuando el usuario entra en la opción tres sin haber accedido a la opción dos.	79
Figura 74: Indicativo del programa al usuario, mostrándole que no ha calculado todos los valores de A.....	79
Figura 75: Vectores de A y de humedad para cada temperatura.	79
Figura 76: Introducción de la temperatura.	80
Figura 77: Código Matlab correspondiente al bucle while y la sentencia if del módulo AjusteA.....	80
Figura 78: Dependencia de A con la humedad para una temperatura de 130°C.	80
Figura 79: Indicadores del ajuste de la evolución de A con la humedad.	81
Figura 80: Código Matlab correspondiente al módulo CrearAjusteA.	82
Figura 81: Indicativo del programa cuando el usuario entra en la opción cuatro sin haber accedido a la opción dos.	82
Figura 82: Indicativo del programa al usuario, mostrándole que no ha calculado todos los valores de k.	83
Figura 83: Variables donde se calcula el $\ln(k)$ y la inversa de la temperatura.	83
Figura 84: Vectores $\ln(k)$ y $(1/T)$ para cada humedad.	84
Figura 85: Introducción de la humedad.	84
Figura 86: Código Matlab correspondiente al bucle while y la sentencia if del módulo AjusteK.....	85
Figura 87: Vectores de la energía de activación y humedad.....	85
Figura 88: Evolución del $\ln(k)$ frente a $1/T$ para una humedad de 1,01%.....	86
Figura 89: Coeficientes de la ecuación, los indicadores de bondad del ajuste y el valor de la energía de activación obtenida a partir del ajuste.	86
Figura 90: Código Matlab correspondiente a la sentencia "if" y al redireccionamiento al modulo "CrearAjusteEa".	87
Figura 91: Evolución de E_a frente a la humedad.....	87
Figura 92: Coeficientes de la ecuación y los indicadores de bondad del ajuste.	87
Figura 93: Código Matlab correspondiente al módulo CrearAjusteK.	88
Figura 94: Código Matlab correspondiente al módulo CrearAjusteEa.....	89
Figura 95: Curvas de envejecimiento para $T=130^{\circ}\text{C}$	92
Figura 96: Curvas de envejecimiento para $T=110^{\circ}\text{C}$	92
Figura 97: Curvas de envejecimiento para $T=120^{\circ}\text{C}$	92
Figura 98: Ajuste de las curvas de envejecimiento correspondientes a $T=130^{\circ}\text{C}$ y $H=1,01$ y $H=2,92$	95
Figura 99: Ajuste de la curvas de envejecimiento correspondientes a $T=130^{\circ}\text{C}$ y $H=1,94$	95

Figura 100: Ajuste de las curvas de envejecimiento correspondientes a $T=110^{\circ}\text{C}$ y $H=0,11$ y $H=1,01$	95
Figura 101: Ajuste de las curvas de envejecimiento correspondientes a $T=110^{\circ}\text{C}$ y $H=1,94$ y $H=2,92$	96
Figura 102: Ajuste de las curvas de envejecimiento correspondientes a $T=120^{\circ}\text{C}$ y $H=0,89$ y $H=1,03$	96
Figura 103: Ajuste de las curvas de envejecimiento correspondientes a $T=130^{\circ}\text{C}$ y $H=2,47$ y $H=4,28$	96
Figura 104: Ajuste de los valores de A frente a la humedad obtenidos por la UC3M para una temperatura de 130°C	98
Figura 105: Ajuste de los valores de A frente a la humedad obtenidos por la UC3M para una temperatura de 110°C	98
Figura 106: Ajuste de los valores de A frente a la humedad obtenidos por la UC3M para una temperatura de 120°C	99
Figura 107: Evolución de los valores de A reportados por los diferentes autores (Emsley, Lundgaard, Lelekakis y UC3M) para un contenido en oxígeno bajo.	100
Figura 108: Ajuste lineal de los valores de A frente a la humedad reportados por los diferentes autores (Emsley, Lundgaard, Lelekakis y UC3M) para un contenido en oxígeno bajo.	101
Figura 109: Ajuste a un polinomio de grado 2 de los valores de A frente a la humedad reportados por los diferentes autores (Emsley, Lundgaard, Lelekakis y UC3M) para un contenido en oxígeno bajo.	101
Figura 110: Ajuste lineal de los valores de A frente a la humedad reportados por los diferentes autores (Emsley, Lundgaard, Lelekakis y UC3M), eliminando el punto (4; $3,5\text{E}+08$) de Emsley y forzando a que la curva ajustada pase por el origen, para un contenido en oxígeno bajo.	102
Figura 111: Ajuste a un polinomio de grado 2 de los valores de A frente a la humedad reportados por los diferentes autores (Emsley, Lundgaard, Lelekakis y UC3M), eliminando el punto (4; $3,5\text{E}+08$) de Emsley y forzando a que la curva ajustada pase por el origen, para un contenido en oxígeno bajo.	102
Figura 112: Evolución de los valores de A obtenidos en la UC3M y obtenidos por Lelekakis para un contenido medio en oxígeno.	104
Figura 113: Ajuste de los valores de A frente a la humedad obtenidos por la UC3M para el caso de contenido en oxígeno medio.	104
Figura 114: Ajuste del $\ln(k)$ frente a $1/T$ para una humedad de $1,01\%$	105
Figura 115: Ajuste del $\ln(k)$ frente a $1/T$ para una humedad de $1,94\%$	106
Figura 116: Ajuste del $\ln(k)$ frente a $1/T$ para una humedad de $2,92\%$	106
Figura 117: Ajuste de las energías de activación con la humedad.	107

Índice de tablas:

Tabla 1: Uso de líquido aislantes [10].....	23
Tabla 2: Valores de A calculados por Emsley y Lundgaard para diferentes humedades y una Ea de 111 KJ/mol.	43
Tabla 3: Valores de A y Ea obtenidos por Lundgaard para la reacción de hidrólisis del papel Kraft.	44
Tabla 4: Valores de A y Ea obtenidos por Lundgaard para la reacción de hidrólisis del papel térmicamente mejorado.	44
Tabla 5: Tasa de envejecimiento para papel Kraft a diferentes niveles de humedad y temperatura.	48
Tabla 6: Valores de A y Ea determinados para diferentes contenidos de agua en el papel Kraft en baja concentración de oxígeno.....	50
Tabla 7: Diferencias entre la vida calculada utilizando la figura 35 y la calculada utilizando la figura 36.	54
Tabla 8: Tasa de envejecimiento para papel Kraft con una concentración de oxígeno media (7000-14000 ppm).	56
Tabla 9: Tasa de envejecimiento para papel Kraft con una concentración de oxígeno alta (16500-25000 ppm).	56
Tabla 10: (1DPt-1DP0) frente al tiempo para papel Kraft con una concentración de oxígeno media (7000-14000 ppm).	58
Tabla 11: (1DPt-1DP0) frente al tiempo para papel Kraft y con una concentración de oxígeno alta (16500-25000 ppm).	58
Tabla 12: Valores de A y de Ea para papel Kraft con un contenido oxígeno media y alta.	59
Tabla 13: Experimentos de envejecimiento de papeles aislantes realizados en la Universidad Carlos III.	64
Tabla 14: Valores máximos, mínimos y la mediana de k.....	90
Tabla 15: Valores de k para papel Kraft a para una concentración de oxígeno baja obtenidos por Lelekakis.	91
Tabla 16: Valores de k para papel Kraft con una concentración de oxígeno media (7000-14000 ppm) obtenidos por Lelekakis.....	91
Tabla 17: Valores de k para papel Kraft con una concentración de oxígeno alta (16500-25000 ppm) obtenidos por Lelekakis.	91
Tabla 18: Puntos eliminados de cada ensayo de envejecimiento.....	94
Tabla 19: Ajuste de las gráficas de (1DPt-1DP0).	94
Tabla 20: Valores de A obtenidos en la UC3M.	97
Tabla 21: Valores de A obtenidos por la Universidad Carlos III y valores de A reportados por diferentes autores con contenido de oxígeno bajo.....	100
Tabla 22: Valores de A obtenidos en la Universidad Carlos III y valores de A reportados por Llekakis con contenido de oxígeno medio.....	103

ABSTRACT

The purpose of this Paper is the implementation of a program to enable gathering parameters for the aging model proposed by Emsley based on an adjustment of the various values obtained from aging trials carried out at University Carlos III of Madrid.

In order to tackle this work properly while gaining a better insight on transformers, a brief explanation has been given about the operation of a transformer and the elements comprising it.

In view of the fact that continuous operation of a transformer depends on the condition of the insulation paper, an explanation has been provided on the composition of such paper, drivers for decay (moisture, temperature, oxygen) that gives rise to three chemical reactions (hydrolysis, oxidation and pyrolysis, and the related impact. These effects result a decreased polymerization level of the insulating paper, which in turn leads to a decreased mechanical resistance of the same.

Throughout time, the industry has endeavoured to find an approximate numerical value for a transformer's life cycle in which solid insulation is an element determining the life of transformers by means of the implementation of various methods. A review of literature on such methods was made, which focused on the work carried out around the model published by Emsley as one widely accepted by the international scientific community to describe aging of cellulose insulation.

Emsley published an aging model that provides a degree of polymerization of paper based on temperature.

In order to be able to apply this model, a series of parameters must be obtained on an empirical manner; therefore, a review of literature on the various research made after publication of the Emsley's model describing and the values of such parameters was undertaken.

Once the review of literature was completed, a program was developed consisting in a software application that includes a Matlab executable file and an Excel spreadsheet containing the data obtained from the aging trials performed. This application allows obtaining the values for the parameters of Emsley's models based on an adjustment of the various values obtained in the experimentation undertaken at University Carlos III. This way, we will be able to establish a model for calculation of the lifespan of cellulose insulation.

Once the relevant adjustments have been made and results obtained accordingly, such results have been compared with results obtained by other authors (Lelekakis, Emsley y Lundgaard).

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

El transformador de potencia es un elemento fundamental en la transferencia y distribución de energía eléctrica, que permite el suministro de potencia a los usuarios finales. Su función es establecer un enlace confiable entre las distintas partes de un sistema de potencia (Figura 1) que están a diferentes niveles de tensión. Por lo general, es un dispositivo diseñado para lograr una vida útil de 20-35 años. Aunque en la práctica, la vida del transformador de potencia podría llegar a los 60 años con un mantenimiento apropiado [1].

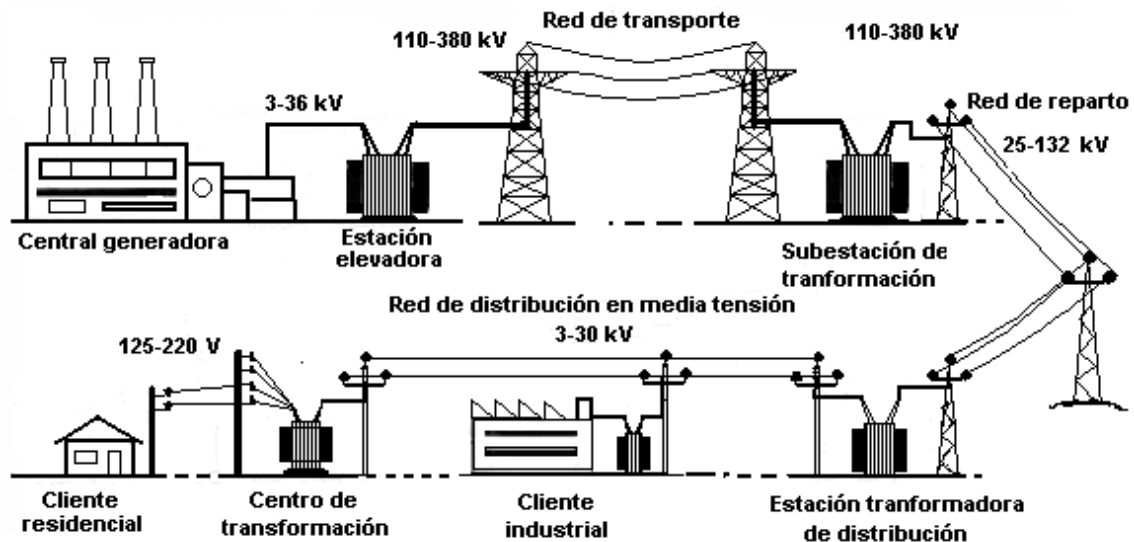


Figura 1: Partes de un sistema de potencia de suministro eléctrico.

Debido a que el transformador es un elemento fundamental en la red eléctrica, es importante tanto su mantenimiento como el conocimiento y evaluación de la vida del transformador. La evaluación de la vida de cualquier equipo tiene relación con su proceso de envejecimiento. Las máquinas eléctricas se deterioran de diferentes maneras, de acuerdo con su diseño y propósito. Cualquier máquina está expuesta (en mayor o menor grado), a sollicitaciones térmicas, mecánicas, eléctricas y producidas por el medio ambiente [1].

En un transformador los materiales que van a estar sujetos a un mayor envejecimiento son los que componen el aislamiento sólido (aislamiento celulósico) y líquido (aceite mineral).

El aislamiento líquido se puede tratar (secado del aceite, reacondicionamiento o regeneración del aceite, etc.) para que recupere sus propiedades, o incluso, si el nivel de degradación del aceite está muy avanzado, se podría sustituir. Sin embargo, cambiar el aislamiento sólido por otro nuevo supondría un coste más elevado, por lo que no puede ser renovado.

El papel impregnado en aceite se utiliza en la inmensa mayoría de transformadores como aislamiento de los devanados del transformador. El aislamiento sólido de un transformador no se puede reparar ni sustituir, por lo que la industria considera que el factor que determina el final de la vida del transformador, es la vida del papel aislante [1].

Los factores que producen el envejecimiento del papel aislante son la temperatura, la humedad, el oxígeno y otros compuestos como los ácidos, generados a partir de las reacciones químicas (hidrólisis, oxidación y pirólisis) producidas por estos factores dentro del transformador.

Conocer el estado de envejecimiento de un transformador es importante para saber con más exactitud cuándo éste se debe apartar del servicio. Esto tiene importancia, ya que si se aparta un transformador antes de que su vida útil haya llegado a su fin, se está desaprovechando y por lo tanto perdiendo un bien que tiene un valor elevado. Por el contrario, si lo mantenemos en servicio cuando su vida útil ya ha llegado a su fin, ponemos en riesgo la calidad del suministro, ya que se pueden producir cortes de suministro por causa de fallos en el transformador.

Por ello, la industria ha desarrollado diferentes métodos que permiten estimar de manera aproximada la vida remanente de un transformador, así como hacer estudios sobre la pérdida de vida que se produciría en un transformador bajo unas determinadas condiciones de operación. Estos métodos son las guías de carga, la obtención de grado de polimerización de forma directa y la obtención del grado de polimerización a partir del contenido de furanos [1].

Las guías de carga (IEEE [2] y IEC [3]) se han empleado como referencia obligatoria para el cálculo de la vida del aislamiento. En estas guías solo se tiene en cuenta el efecto de la temperatura como factor de degradación y no se tienen en cuenta otros factores anteriormente nombrados (agua, oxígeno, ácidos) que van a influir de una manera significativa en el proceso de degradación del papel aislante. Por ello, las guías de carga van a arrojar unos valores de envejecimiento muy conservadores. Algunos autores (Lelekakis, Emsley, Lundgaard, etc.) han realizado estudios y han propuesto modelos que permiten tener en cuenta estos factores.

En este trabajo se va a estudiar un modelo que estima el grado de polimerización del papel en función del tiempo de operación. En este modelo, el estado del papel se cuantifica por su grado de polimerización, relacionándolo con la rigidez mecánica del

papel aislante. El grado de polimerización de un papel aislante recién fabricado esta normalmente alrededor de 1000 y va a ir reduciéndose con el envejecimiento del transformador hasta un valor de 200, donde se considera que el papel pierde sus propiedades mecánicas volviéndose quebradizo. Esto podría dar lugar a la aparición de cortocircuitos entre espiras en el transformador.

Por este motivo es importante conocer la evolución del grado de polimerización del papel aislante en el tiempo y el efecto que producen sobre él las reacciones químicas generadas por el agua, temperatura y el oxígeno. La estimación del grado de polimerización del papel permitirá determinar cuándo se debe sacar un equipo de servicio.

1.2 OBJETIVO

El aislamiento celulósico de los transformadores de potencia envejece debido a la temperatura y otros factores como la humedad, el oxígeno, la acidez, etc. Este envejecimiento se traduce en una disminución del grado de polimerización del papel, que produce una reducción de su resistencia mecánica del mismo.

En 1994 Emsley publicó un modelo de envejecimiento [4] que proporciona el grado de polimerización del papel en función de la temperatura y la humedad. Desde entonces, este modelo ha sido aceptado por la comunidad científica. Para poder aplicar este modelo se debe disponer de una serie de parámetros que se deben obtener de forma experimental en función de distintos factores como son la temperatura, el contenido en agua, el contenido en oxígeno, etc. Diferentes autores realizaron estudios posteriores en busca de estos parámetros, describiendo el proceso de obtención de los mismos [5, 6].

En el departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Carlos III de Madrid se han realizado ensayos de envejecimiento acelerados sobre papeles aislantes de transformador con el fin de obtener la influencia de la temperatura y la humedad en dichos parámetros.

El objetivo de este Trabajo de Fin de Grado es desarrollar una aplicación que permita obtener los parámetros del modelo de Emsley a partir del ajuste de los diferentes valores obtenidos en los experimentos realizados. Los parámetros se obtendrán para distintas temperaturas y humedades de ensayo, obteniéndose la ley que los relaciona con dichas variables. Este Trabajo Fin de Grado es continuación de otro trabajo anterior [7]. En [7] se hicieron algunos ajustes de los parámetros y se analizaron las tendencias de estos. En el presente trabajo, se ha mejorado la aplicación significativamente haciéndola mucho más automática e incluyendo nuevos ensayos experimentales realizados a una temperatura 120°C y unos contenidos de humedad de

0,89 %, 1,03 %, 2,47 % y 4,28 %. Se ha hecho una comparación con los resultados de otros autores y se ha estudiado el efecto del oxígeno en los parámetros.

La necesidad de mejorar el programa realizado en [7], surge por la poca flexibilidad que el programa inicial ofrece y por el extenso código de programación que requería. En el presente Trabajo Fin De Grado se ha realizado la programación de nuevo completamente para conseguir un nuevo programa más flexible, que divide en módulos la programación.

1.3 ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO

El Trabajo de Fin de Grado comienza con una introducción (capítulo 1), donde se explica el papel que tiene el transformador de potencia y la importancia del mismo dentro del sistema de potencia. En esta introducción se detalla la importancia de conocer el estado de envejecimiento de un transformador, para saber con más exactitud cuándo se debe apartar del servicio el transformador. También se nombran los diferentes métodos que la industria ha desarrollado con el fin de conseguir un valor numérico aproximado de la vida del transformador, mostrando el método a seguir en el presente trabajo. En este capítulo 1, además se exponen los objetivos del Trabajo de Fin de Grado.

Una vez introducidos los objetivos del trabajo, se expondrán (capítulo 2) los diferentes componentes que forman el transformador, centrándonos en el aislamiento celulósico del transformador (capítulo 3), explicando su composición y envejecimiento.

Después de exponer el envejecimiento del papel aislante, se realiza una revisión bibliográfica sobre los diferentes modelos de pérdida de vida del transformador, centrándonos en el modelo de envejecimiento de Emsley y en las diferentes publicaciones en las que se describe la obtención de los parámetros de dicho modelo (capítulo 4).

Posteriormente (capítulo 5), se describen los experimentos realizados en el Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Carlos III de Madrid y el desarrollo del programa mediante Matlab, para obtener los parámetros del modelo de Emsley.

En el capítulo 6, se recogen los resultados obtenidos mediante la aplicación y su comparación con los valores obtenidos por los demás autores.

Para finalizar, se realiza un resumen del contenido del trabajo (capítulo 7), se exponen las conclusiones obtenidas de los resultados del programa desarrollado y se aportan posibles trabajos futuros.

CAPÍTULO 2: EL TRANSFORMADOR DE POTENCIA

2.1 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO

Un transformador es una máquina estática que trasvasa energía entre dos sistemas que se encuentran a diferente nivel de tensión alterna, sin alterar ni la frecuencia ni el desfase de la onda de corriente alterna.

Un transformador está formado, como mínimo por un núcleo magnético y por dos o más arrollamientos (Figura 2) [8].

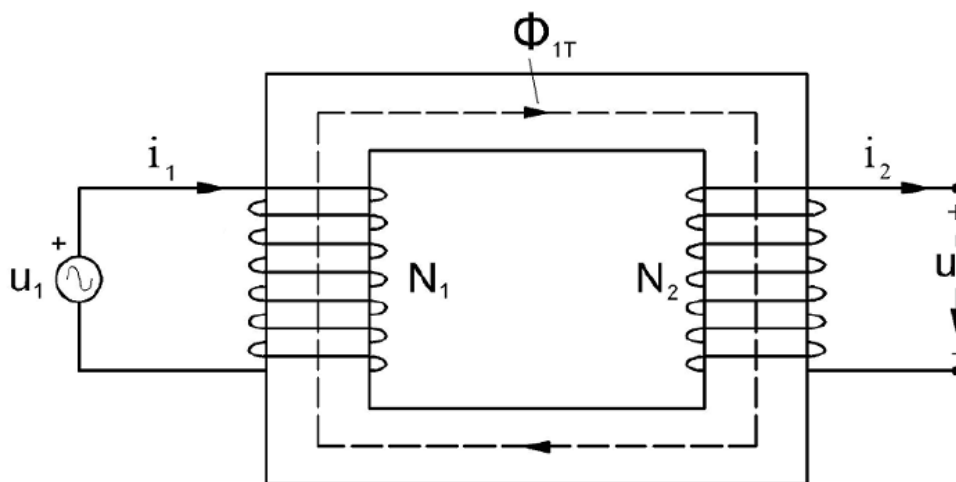


Figura 2: Esquema de funcionamiento de un transformador.

El arrollamiento primario crea un flujo sinusoidal variable en el tiempo que atraviesa el arrollamiento secundario y genera en él una f.e.m. Esta f.e.m puede ser aplicada a una carga, de modo que circule por ella una intensidad y se ceda potencia a la carga.

Un transformador basa su funcionamiento en la ley de Faraday o ley de inducción Electromagnética de Faraday. Esta ley establece que la tensión que se induce en un circuito cerrado es directamente proporcional a la rapidez con la que cambia en el tiempo el flujo magnético que atraviesa una superficie.

La potencia que entrega el transformador es inferior a la potencia que se le suministra al mismo. Esta pequeña diferencia se debe a un conjunto de pérdidas como son las pérdidas en el cobre (pérdidas efecto Joule) y las pérdidas en el hierro (pérdidas por histéresis y corrientes de Foucault). En todo caso estas pérdidas son tan reducidas que el rendimiento de los grandes transformadores ronda el 99,7% al no disponer de partes móviles.

El Transformador (Figura 3) es un componente esencial del Sistema Eléctrico de Potencia y es uno de los activos más valiosos de una compañía eléctrica.



Figura 3: Transformador.

2.2 NÚCLEO MAGNÉTICO

El núcleo magnético es el encargado de dirigir el flujo magnético desde el arrollamiento primario al secundario. El trasvase de energía entre los arrollamientos se realiza a través del flujo magnético.

El núcleo magnético está formado por chapas de acero al silicio agrupadas y aisladas entre sí. Este aislamiento de las chapas se realiza mediante un tratamiento químico superficial llamado carlite (un fosfanato), para evitar que las corrientes de Foucault se comuniquen entre chapas. Normalmente las chapas magnéticas tienen 0,3 mm de espesor y se colocan de esta forma para aumentar la resistencia del hierro al paso de la corriente y reducir las pérdidas. Al utilizar chapas magnéticas reducimos el fenómeno de apantallamiento (las corrientes de Foucault se oponen al flujo que las produjo, con lo que en el interior del núcleo magnético el flujo es menor que en el borde del mismo) producido por las corrientes de Foucault.

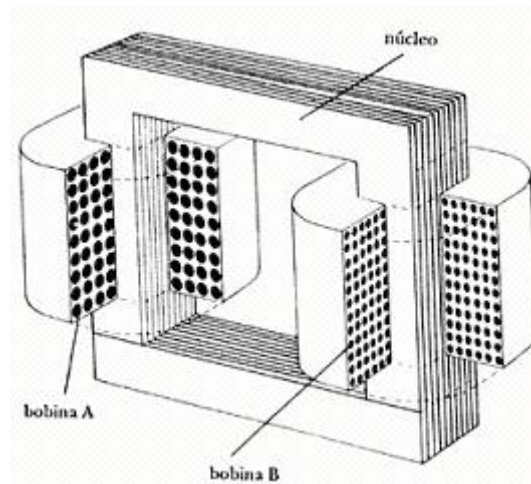


Figura 4: Chapas formando el núcleo magnético.

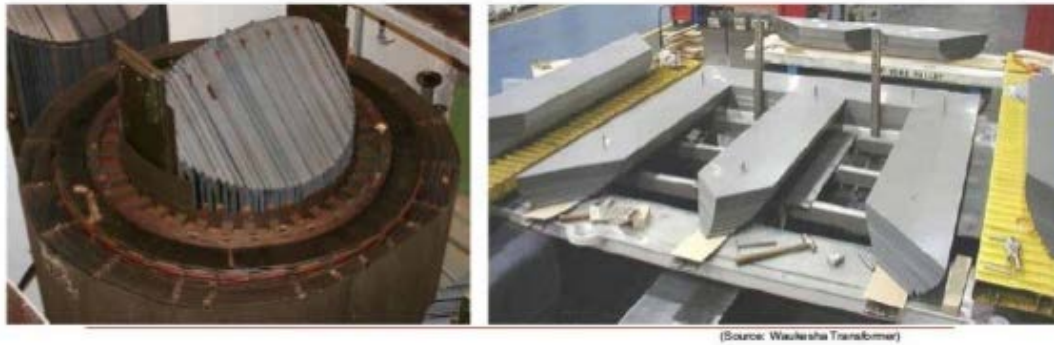


Figura 5: Bobina y chapas del núcleo magnético.

Es sabido que cuando una superficie es atravesada por un flujo variable en el tiempo se engendra en él una fuerza electromotriz. Esta fuerza electromotriz produce unas corrientes parásitas. Al circular estas corrientes por el interior del núcleo magnético provocan unas pérdidas de potencia activa denominadas pérdidas por Foucault [8].

$$P_{Fo} = \frac{U^2}{R_{Fe}} = \frac{(4,44fBS_{Fe})^2}{\rho_{Fe} \frac{\ell_{Fe}}{S_{Fe}}} = K_{Fo} B^2 f^2 V_{Fe}$$

Donde:

- P_{Fo} , son las pérdidas de potencia activa por corrientes de Foucault.
- R_{Fe} , es la resistencia que opone el hierro al paso de corrientes.
- U_{Fo} , es la f.e.m. que da lugar a las corrientes de Foucault.
- B , es la inducción en la chapa magnética.
- f , es la frecuencia.
- V_{Fe} , es el volumen de hierro del transformador.

De la expresión anterior se deduce, que para reducir las pérdidas de potencia activa se debe aumentar la resistencia del hierro al paso de corriente. Esto se consigue utilizando chapas magnéticas con un cierto porcentaje de silicio. Este porcentaje se limita al 3% ya que este las hace más quebradizas, pero su ventaja es que retarda el envejecimiento de la chapa magnética y reduce la magneto estricción, es decir, disminuye el ruido emitido por el transformador. También reduce las pérdidas por histéresis.

El circuito magnético está compuesto por las columnas y las culatas. Las columnas son las partes donde se montan los devanados y las culatas son las partes que realizan la unión entre las columnas. La culata superior se tiene que poder abrir para poder colocar las bobinas y los aislantes. Los espacios entre las columnas y las culatas, por los cuales pasan los devanados, se denominan ventanas del núcleo. Para unir las columnas con las culatas se utilizan las denominadas juntas, y estas deben tener un espesor lo más pequeño posible con objeto de reducir al máximo la reluctancia del circuito magnético.

Otro aspecto característico de los núcleos lo muestran las secciones transversales de las columnas. Estas se construyen para transformadores pequeños de forma cuadrada. En la mayoría de los casos y con el objetivo de obtener un mayor aprovechamiento del área interior de los devanados (de sección circular), la sección transversal de cada rama tiene forma de un polígono escalonado, con un número de escalones que va a aumentar con la potencia del transformador. Esta sección recibe el nombre de cruciforme.

Los transformadores de potencia se pueden clasificar de diversas maneras. Nos centraremos de acuerdo a como han sido contruidos. En esta clasificación quizás la distinción más importante se encuentra en el núcleo tipo columna y el núcleo tipo acorazado.

- De columna: las bobinas están arrolladas alrededor del núcleo y estas abarcan una parte considerable del circuito magnético.

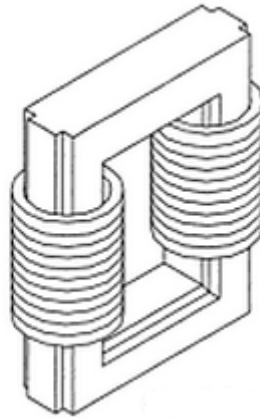


Figura 6: Núcleo de tipo columna.

- Acorazado: el núcleo se encuentra cubriendo los devanados. Presenta una columna central sobre la que van situados los bobinados y otras columnas exteriores que lo recogen en forma de coraza por lo que las espiras quedan más sujetas y soportan mejor a los esfuerzos mecánicos en los cortocircuitos.

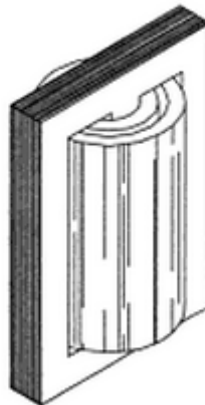


Figura 7: Núcleo acorazado.

2.3 DEVANADOS

Los devanados constituyen el circuito eléctrico del transformador, son los encargados de tomar la energía del sistema eléctrico de alimentación (arrollamiento primario) y entregársela al sistema eléctrico de salida (arrollamiento secundario) [8].

Según [9], lo esencial de los arrollamientos es el número de espiras, siendo de interés secundario la forma de tales espiras y la disposición de los arrollamientos. La relación

entre el número de vueltas del arrollamiento y la tensión es la siguiente:

$$\frac{V_1}{N_2} = \frac{V_2}{N_1}$$

Donde:

- V_1 , es la tensión de entrada en el primario.
- V_2 , es la tensión de entrada en el secundario.
- N_1 , es el número de vueltas en el arrollamiento primario.
- N_2 , es el número de vueltas en el arrollamiento secundario.

Esta característica se utiliza en la red de transporte de energía eléctrica: al poder realizar el transporte a altas tensiones y pequeñas intensidades, se reducen las pérdidas por el efecto Joule y se minimiza el costo de los conductores.

Habitualmente los arrollamientos se forman mediante un hilo o pletina de cobre arrollada sobre un carrete aislante. También se pueden formar mediante folios de cobre o aluminio de una anchura igual al alto del arrollamiento (se utiliza especialmente en el caso de arrollamientos de aluminio o en arrollamientos secundarios de transformadores encapsulados en resina). En ocasiones se emplea aluminio como conductor para ahorrar costes. Las dimensiones de las pletinas o hilos del conductor son fundamentales para que el transformador tenga unas pérdidas de potencia activa reducidas y una resistencia mecánica adecuada para soportar los esfuerzos de cortocircuito.

Los arrollamientos son cilindros concéntricos y dado que el núcleo magnético está puesto a tierra, el arrollamiento de baja tensión es el más interno para evitar problemas de aislamiento.

Cuando por los arrollamientos circula una corriente se crean unas pérdidas de potencia activa (pérdidas por efecto Joule) [8].

$$P_J = RI^2 = \rho \frac{\ell}{S} I^2 = \rho \delta^2 V_{Cu}$$

Donde:

- δ , es la resistividad del cobre.
- ρ , es la densidad de corriente.
- V_{Cu} , es el volumen de cobre.

Los arrollamientos concéntricos se pueden dividir en:

- Arrollamiento en capas: se forman enrollando un cable formando una hélice. Los conductores que forman la hélice están en contacto entre sí.

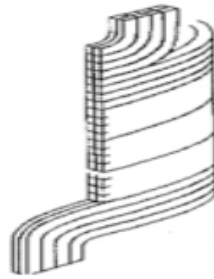


Figura 8: Arrollamientos en capas.

- Arrollamientos helicoidales: se disponen de igual manera que los anteriores pero hay una diferencia y es que en lugar de que los conductores estén en contacto con el anterior y el posterior, estos se separan mediante unos separadores.

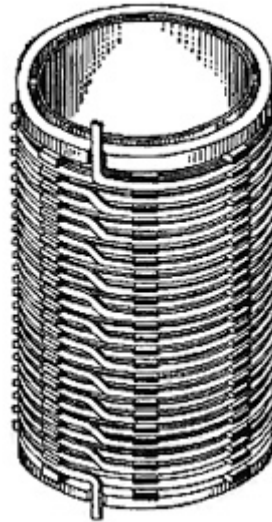


Figura 9: Arrollamiento helicoidal.

- Arrollamientos en disco: cada disco consiste en un conjunto de espiras bobinadas formando una espiral. Entre discos diferentes se coloca un separador, de esta forma conseguimos una mejor refrigeración del devanado. Estos arrollamientos son usados para un gran número de vueltas y corrientes relativamente pequeñas. Los discos están conectados en serie.

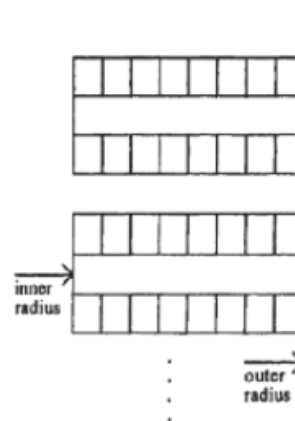
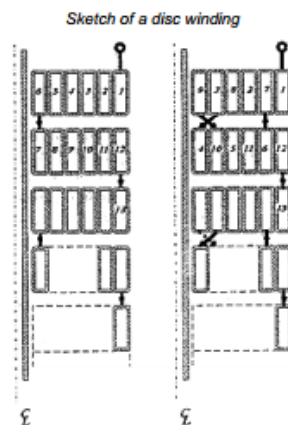
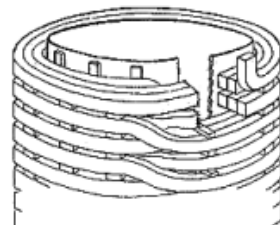


Figura 10: Arrollamiento en disco (izquierda) y conexión en serie de los discos (derecha).

2.4 SISTEMA DE REFRIGERACIÓN

Las pérdidas nombradas anteriormente producen calor y contribuyen al calentamiento de la máquina eléctrica. Es sabido que la vida de un aislamiento depende de la temperatura por lo que sí queremos que un transformador dure mucho tiempo es preciso mantener la temperatura acotada [8].

Para evitar que se produzcan altas temperaturas, los transformadores están dotados de un sistema de refrigeración que va a depender de su potencia nominal. Para potencias pequeñas utilizan de refrigerante el aire exterior y son los denominados transformadores en seco. Para potencias elevadas los transformadores están inmersos en una cuba, de la que hablaremos a continuación, donde son refrigerados por aceite.

2.4.1 El aceite mineral

El aceite tiene una doble misión de refrigerante y aislante. Es un buen refrigerante debido a su viscosidad reducida (esta viscosidad disminuye al aumentar la temperatura), una constante de transmisión de calor por conducción elevada y un elevado calor específico, lo cual es importante para evitar que la temperatura suba muy rápido. También actúa como un chivato que indica el estado del transformador.

Los factores que provocan el envejecimiento del aceite son: el agua, el oxígeno (que oxida el aceite produciendo ácidos, lodos, etc.), la temperatura (que activa la reacción de oxidación y otras reacciones que descomponen el aceite) y la luz (por ello se deben realizar las tomas de muestras en botellas de vidrio opacas) [8].

Los diferentes tipos de aceites utilizados son: los aceites minerales, los ésteres sintéticos y de origen vegetal así como otros tipos de líquidos aislantes como, por ejemplo, las siliconas (Tabla 1)

Transformadores	Aceite mineral	Siliconas	Ésteres sintéticos	Ésteres naturales (aceite vegetales)
Potencia	AU	UN	UC	UC
Distribución	AU	AU	AU	AU
Medida	AU	UN	NU	NU

AU: ampliamente usado; UC: usado pero es menos común; NU: no usado con frecuencia.

Tabla 1: Uso de líquido aislantes [10].

El aceite mineral es el refrigerante más común debido a su bajo coste. El aceite mineral se forma a partir de diferentes hidrocarburos tales como parafinas, naftenos y aromáticos (Figura 11).

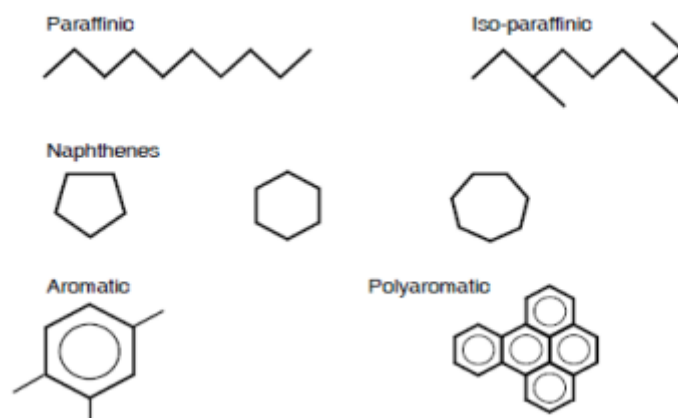


Figura 11: Estructura de los hidrocarburos del aceite mineral.

Las parafinas muestran una cadena lineal o ramificada. Ésta es susceptible al agua y productos de oxidación lo que podría llevar a la generación de lodos. Sin embargo tiene un buen índice de viscosidad. Por otro lado tenemos los naftenos que tienen una estructura en anillo que puede tener entre 5 y 7 átomos de carbono. Básicamente el aceite utilizado como dieléctrico es un hidrocarburo saturado donde los átomos de carbono están conectados por enlaces de valencia CC individuales ya que presentan una mejor estabilidad química.

Pero este aceite tiene también sus desventajas, y éstas son, su bajo punto de inflamación que implica un mayor riesgo de incendio y el alto impacto ambiental al medio. Este punto es importante ya que en los últimos años, el aspecto medioambiental ha cobrado importancia y el desarrollo de tecnologías limpias e igualmente funcionales desde el punto de vista técnico se ha venido imponiendo (Bertrand y Hoang, 2003; Oommen, Claiborne y Mullen, 1997). Otra opción son los transformadores inmersos en silicona que tienen un mejor comportamiento frente al fuego (ya que los vapores de la silicona sofocan el fuego), pero este tipo de transformadores están condicionados en sitios donde puedan emplearse refrigeradores o bombas, debido a la elevada viscosidad de la silicona que reduce la capacidad de transferencia de calor.

En los últimos años, los ésteres sintéticos se han aplicado en transformadores de distribución ya que producen beneficios en los que respecta a la humedad de la celulosa y también se comportan bien con el medio ambiente. También se están utilizando aceites vegetales que ofrecen una mayor seguridad ante incendios, por tener una elevada resistencia al fuego (Oommen, 2002). Respecto a la humedad, tienen límites mucho más altos de saturación en todas las temperaturas en comparación con el aceite mineral. En condiciones normales, la saturación de agua de

los aceites vegetales es de 5 a 8 veces la del aceite mineral. Tienen mayor afinidad por el agua. Esto hace que el sistema papel/aceite retenga menos agua. Pero estos aceites son más caros que los aceites minerales.

2.4.2 Designación del sistema de refrigeración

Para nombrar el tipo de sistema de refrigeración se utiliza un código de cuatro letras: las dos primeras se refieren al refrigerante interno que se encuentra en contacto con la parte activa del transformador mientras que las dos últimas se refieren al refrigerante externo a la cuba. En cada pareja de letras la primera letra muestra la naturaleza del refrigerante y la segunda letra la forma de circulación [8].

Para indicar la naturaleza del refrigerante se utilizan las siglas A, O, L, G (aire, aceite, líquidos aislante y gases refrigerantes), mientras que para indicar la forma de circulación se utilizan las siglas N, F y D (natural, forzada y dirigida). La circulación del aceite refrigerante en el circuito interno se puede forzar mediante bombas y la circulación del aire en el circuito externo mediante ventiladores, de esta manera podremos evacuar más energía en menos tiempo y por tanto poder llevar al transformador a puntos de trabajo de mayor sobrecarga.

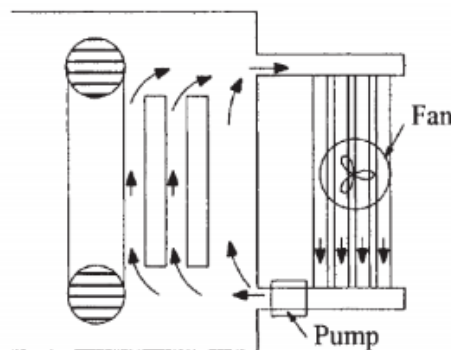


Figura 12: Circulación de aceite forzada.

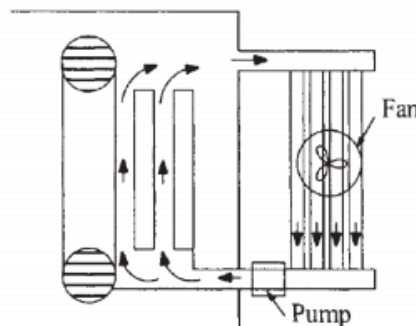


Figura 13: Circulación de aceite dirigida.

2.5 LA CUBA

La cuba (Figura 14) es un depósito que contiene el líquido refrigerante (normalmente aceite). Dentro de él se encuentran sumergidas las partes activas del transformador (el núcleo y las bobinas). Además realiza la función de protección de estas partes activas.

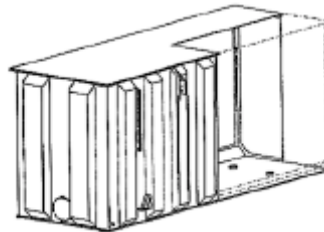


Figura 14: Cuba de un transformador.

En transformadores pequeños, el transformador es de llenado integral (Figura 15), esto es, se llenan de aceite hasta más arriba de la tapa superior de la cuba. Cuando el aceite se dilata, la cuba aumenta su volumen y este aumento de volumen es posible gracias a unas aletas de refrigeración con cierta elasticidad [8]. Además, está sellado. De esta forma se evita el contacto del aceite con el oxígeno.



Figura 15: Transformador de distribución de llenado integral.

En transformadores grandes se une a la cuba un depósito de expansión (Figura 16) que debe de estar más alejado de los focos de generación de calor y se coloca en la parte alta del transformador. Ayuda a reducir el envejecimiento del aceite. En este depósito, el aceite y el aire, están en contacto provocando que parte de los gases del aire se disuelvan en el aceite y penetre además cierto contenido de humedad del aire. Para reducir en la medida de lo posible el contenido humedad, la salida de aire desde el

depósito de expansión se realiza a través de una tubería que finaliza en un cartucho con un compuesto desecante llamado Silicagel, cuya función es evitar que el aire que entra contenga humedad. El Silicagel lleva a cabo su misión en condiciones normales, pero en casos como una desconexión de la red en días de lluvia o niebla puede llegar a penetrar humedad en el aceite.

Existen otros sistemas de preservación en los que se tiene una membrana de caucho entre el aceite y el aire, de modo que cuando el aceite se calienta la membrana se expande y cuando el aceite se enfría la membrana se contrae. Con el tiempo esta membrana envejece y pierde su efectividad. Este tipo de sistema se utiliza principalmente en América.



Figura 16: Transformador de potencia con depósito de expansión.

2.6 SISTEMA DE AISLAMIENTO

El aislamiento se encarga de aislar eléctricamente las partes de un equipo que se encuentren a diferente potencial eléctrico. Por esta razón el buen estado del aislamiento es esencial para determinar la fiabilidad del transformador.

El sistema de aislamiento consta de dos partes principales:

- El aislamiento líquido: es sobre el que recae el mayor esfuerzo dieléctrico. Posee una elevada rigidez dieléctrica, una reducida permitividad (el campo eléctrico en el aceite va a ser mayor que en los aislamientos sólidos del transformador) y es un aislamiento eléctrico regenerable, pues en el caso de que se produzca un arco eléctrico en su interior, el aceite recupera su rigidez dieléctrica cuando se apague el arco y precipiten las partículas quemadas.

Este fluido sirve para tres propósitos primordiales [11]:

- Provee una rigidez dieléctrica.
 - Proporciona un enfriamiento eficiente.
 - Protege al resto del sistema aislante
- El aislamiento sólido: Este sistema debe cumplir cuatro importantes funciones [11]:
 - Capacidad para resistir las tensiones parcialmente altas encontradas en servicio normal (esfuerzos dieléctricos). Esto incluye ondas de tipo impulso y transitorias.
 - Capacidad para resistir los esfuerzos mecánicos y térmicos generados por un cortocircuito.
 - Capacidad para prevenir excesivas acumulaciones de calor (transmisión de calor).
 - Capacidad para mantener las características deseadas para un período de vida de servicio aceptable con un adecuado mantenimiento.

Los diferentes tipos de aislamiento sólidos empleados son: papel, (llamado normalmente papel Kraft) para cubrirlos conductores de los bobinados y cartón prensado (llamado pressboard) que dan forma a estructuras de aislamiento rígidas.

Estos tipos de aislamiento van a tener diferentes espesores y densidades dentro del transformador, conforme a las solicitaciones dieléctricas y mecánicas a las que son sometidos durante la operación del transformador. De esta manera podemos dividir el aislamiento sólidos del transformador en aislamiento delgado, que es el que rodea los conductores y aislamiento grueso, que se puede moldear de diferentes maneras (cilindros aislantes entre los arrollamientos, etc.).

Como vemos (Figura 17), el aislamiento sólido del transformador se forma mediante cilindros concéntricos separados por canales de aceite para mejorar la refrigeración. Estos canales de refrigeración se realizan interponiendo varias chapas de 1mm aproximadamente de espesor, sobre las que se fijan listones, que se encargan de mantener la distancia y se colocan de modo que no alteren la circulación del fluido de refrigeración.

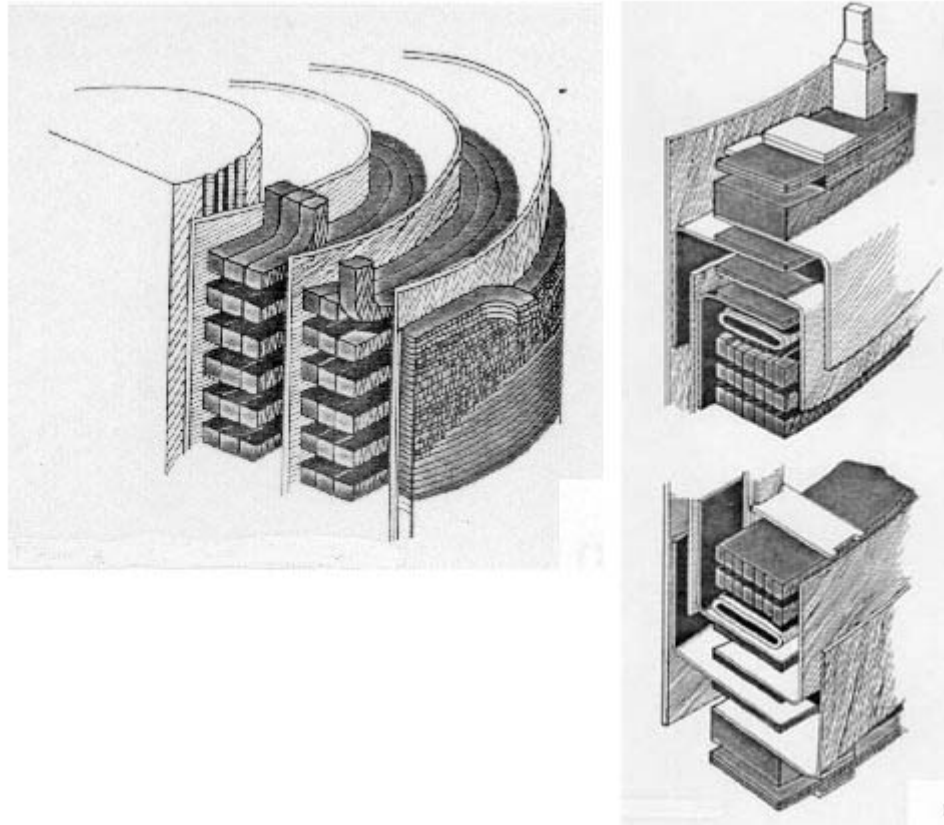


Figura 17: Aislamiento sólido de un transformador.

CAPÍTULO 3: ENVEJECIMIENTO DEL AISLAMIENTO SÓLIDO

En los transformadores de potencia, la celulosa se utiliza en diversas formas, papel Kraft y cartón prensado (pressboard), como material de aislamiento sólido.

Para la fabricación del papel Kraft y el cartón prensado (pressboard) se utiliza la madera, tratada mediante el proceso Kraft, mediante el cual, se refina la celulosa del árbol. Este aislamiento celulósico hecho de pura pulpa “Kraft” ofrece unas magníficas características de impregnación de aceite, que proporciona un excelente rendimiento en los campos eléctricos. Además posee una buena estabilidad geométrica en aceite, es fácil de moldear, envolver y curvar, entre otras características. Por otro lado puede tener diferentes densidades. Además se puede mejorar el envejecimiento de la celulosa, mediante la adición de diversos compuestos que contienen nitrógeno [12].

3.1 COMPOSICIÓN DEL PAPEL AISLANTE

Habitualmente la composición del papel cuando ya se ha llevado a cabo el proceso “Kraft” es de 78-80 % de celulosa, 10-20% de hemicelulosa y 2-6% de lignina. En este proceso la lignina y la hemicelulosa son parcialmente eliminados [12].

La celulosa, componente esencial del papel, es un polisacárido formado exclusivamente de moléculas de glucosa (monosacáridos) unidas entre sí. La celulosa es una larga cadena polimérica de peso molecular variable formada por la unión de moléculas de β -glucopiranosas mediante enlaces β -1,4-O-glucosídicos. Su estructura es la siguiente (Figura 18):

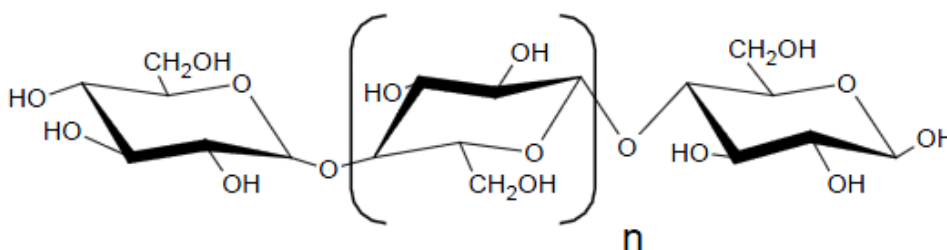


Figura 18: Estructura de la celulosa [12].

Las hemicelulosas son un conjunto de sustancias no uniformes de polisacáridos complejos que no son de celulosa. Su grado de polimerización es básicamente menor (entre 50-250) que el de la celulosa (1200). La hemicelulosa crea la matriz real en el que están incrustadas las fibras de la celulosa. La hemicelulosa presente en las fibras de la celulosa juega también un papel importante en la resistencia mecánica, es decir, en la unión fibra a fibra, debido a que sus grupos hidroxilo forman los puentes de hidrógeno necesario para el enlace químico [12].

La lignina (Figura 19) es una sustancia polimérica natural que es difícil de degradar. Forma junto con la celulosa el componente principal de la madera [12].

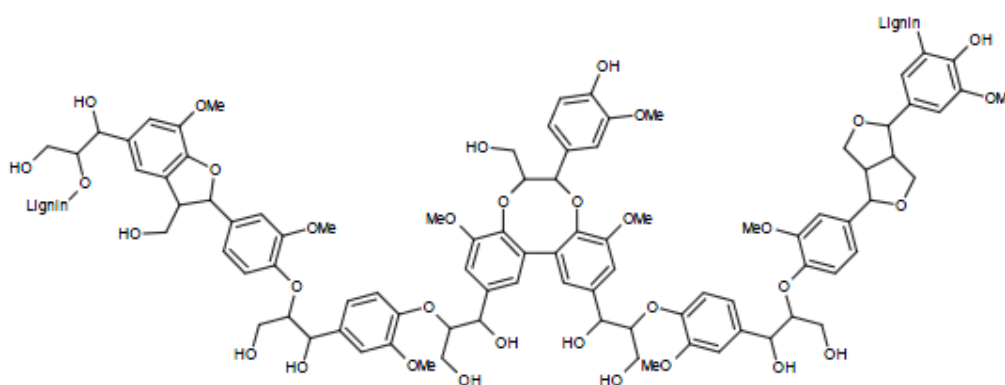


Figura 19: Estructura de la lignina.

3.2 ENVEJECIMIENTO DEL PAPEL AISLANTE

El proceso de degradación del papel se basa en una despolimerización. Esta despolimerización consiste en la ruptura de las cadenas poliméricas, produciendo una disminución del grado de polimerización, que es el número de veces que se repite la unidad monómerica en una cadena. Al reducirse el grado de polimerización, también se reduce la rigidez mecánica del papel. El papel kraft nuevo presenta un grado de polimerización de aproximadamente 1200.

Según McNutt [13], el proceso de degradación de la celulosa debe a tres factores principales. Estos factores son el oxígeno, la humedad y la temperatura. A continuación se verán las reacciones químicas que producen estos tres factores.

3.2.1 Oxidación

Como se ha visto anteriormente, el aceite mineral se compone principalmente de tres tipos de hidrocarburos: parafinas, naftenos y aromáticos.

Estas moléculas reaccionan con el oxígeno disuelto en el aceite para formar ácidos carboxílicos y otros grupos funcionales, tales como aldehídos y cetonas.

Los ácidos carboxílicos son producidos por una serie de reacciones de radicales libres que implican peróxidos, como se muestran en la figura 20 [14].

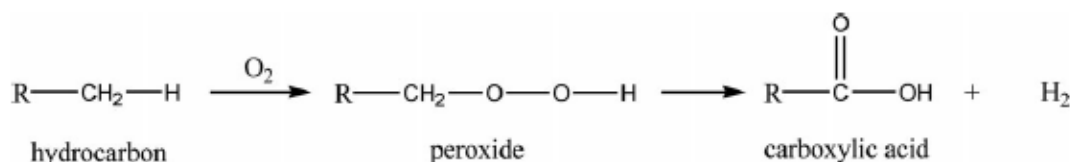


Figura 20: Oxidación del aceite mineral para formar ácidos carboxílicos.

Los ácidos carboxílicos tienen afinidad con la celulosa (papel) y el agua debido su capacidad para unirse con el grupo hidroxilo (-OH). Según la teoría ácido-base de Bronsted-Lowry, estos reaccionan químicamente donando un protón (H^+). Esta tendencia que presenta el ácido para disociarse en H^+ cationes y aniones RCOO^- se cuantifica por su constante de disociación (K_a). Esta constante indica la fuerza del ácido y está relacionada con la proporción de las moléculas que se han disociado en cationes y aniones. Además K_a se puede representar de forma logarítmica ($\text{p}K_a$) debido a los muchos valores de magnitud que pueden abarcar los valores de K_a [14].

La oxidación del aceite produce muchos ácidos con pesos moleculares diferentes. En función de este peso molecular, los ácidos van a tener influencia o no en la tasa de envejecimiento del papel. Los ácidos con altos pesos moleculares tendrán una menor afinidad por la celulosa que los ácidos con bajos pesos moleculares, debido a la naturaleza hidrofóbica del grupo alquilo ($\text{C}_n\text{H}_{2n+1}$). Ingebrigsten et al. [15] estudiaron la solubilidad de los ácidos esteáricos y naftenicos pesados formados por la oxidación del aceite, y se encontró que no fueron absorbidos por el papel, pero se mantuvieron en el aceite. Más tarde, Lundgaard et al. [16] demostraron que estos ácidos no son agresivos, en el sentido de que no aumentan la tasa de envejecimiento del papel Kraft. Los ácidos de bajo peso molecular (hasta 5 átomos de carbono) son más hidrófilos que los ácidos de alto peso molecular y tienen una mayor influencia en la tasa de degradación del papel por hidrólisis ácida, de la cual se hablara posteriormente. Estos ácidos de bajo peso molecular se van a convertir en catalizadores para la hidrólisis ácida. Por lo tanto la solubilidad de un ácido en el aceite afecta a la tasa de envejecimiento del papel, ya que si el ácido se mantiene disuelto en el aceite, no afecta al papel.

La acumulación de ácidos en el aceite conduce a la formación de depósitos insolubles (lodos). Estos lodos pueden reducir la transferencia de calor si se depositan en el papel, causando la degradación térmica del aislamiento del papel [14].

Todos estos ácidos producen una degradación del papel molécula a molécula, produciendo humedad, la cual debilita las uniones de las moléculas de la glucosa del papel, por lo que reacciones secundarias provocarían rupturas en la cadena del polímero lineal (celulosa), disminuyendo así su DP y su rigidez mecánica. En definitiva el oxígeno afecta negativamente a la vida del papel aislante.

3.2.2 Hidrólisis

La hidrólisis que se produce en un transformador es frecuentemente una hidrólisis ácida. Según [14], las reacciones a través de las cuales se descompone la celulosa del papel, se muestran en la figura 21:

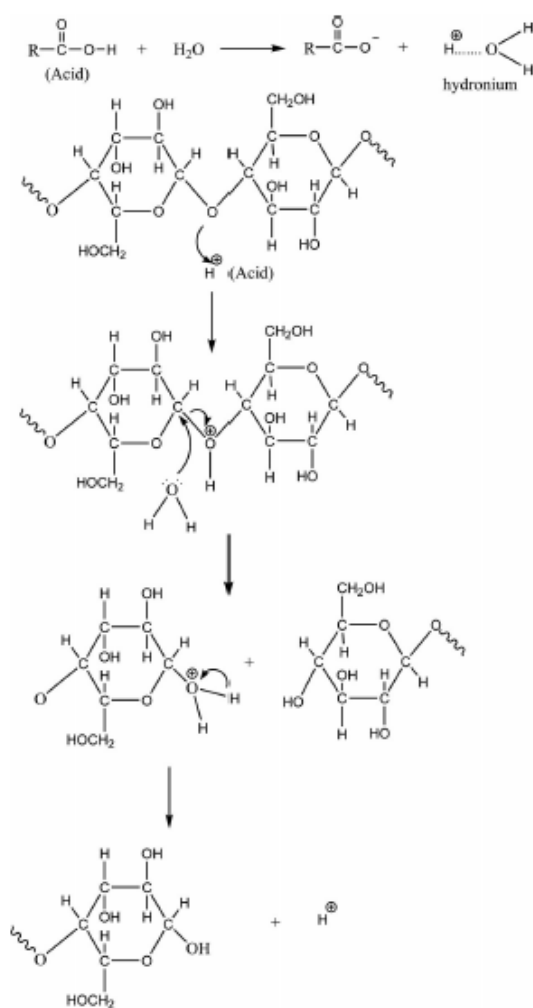


Figura 21: Esquema de la hidrólisis ácida de la celulosa.

El ácido transfiere un protón al agua, formando hidronio, que luego transfiere el protón a la celulosa, iniciando una escisión de la cadena. Según la teoría ácido-base de Bronsted-Lowry, el ácido podría transferir el protón directamente a la celulosa, sin tener que transferirlo al agua. Sin embargo el agua acepta mejor los protones que la celulosa porque es más polar, es decir, hay una diferencia de electronegatividad más grande entre el oxígeno y el hidrógeno en el agua que entre el oxígeno y el carbono en la celulosa. El protón compartirá electrones con el oxígeno en la celulosa hasta que el agua provoque la escisión de la cadena [14].

El hidronio formado es particularmente dañino debido a que después de que se done un protón a la celulosa, la molécula de agua restante puede entonces reaccionar con la celulosa. Hay que tener en cuenta que una molécula de agua se consume durante la escisión de la cadena, mientras que se recupera un ion H^+ , es decir, la concentración de iones H^+ se mantiene sin cambios. Según este mecanismo de reacción, la velocidad de reacción dependerá de la concentración de agua y de los ácidos disociados o más bien de los iones H^+ que puedan entrar en las zonas amorfas de la celulosa (hemicelulosa y lignina) y que reducen la resistencia mecánica del papel [14].

Además la hidrólisis del papel produce CO, CO₂ y compuestos furánicos.

3.2.3 Pirólisis

La pirólisis es un proceso que se puede dar sin acceso al agua y/u oxígeno, o cualquier otro agente para iniciar la descomposición. Para temperaturas de funcionamiento normales o de sobrecarga (es decir, menores de 140°C) este proceso se considera de escasa relevancia. A altas temperaturas puede producir la ruptura de monómeros individuales en la cadena de la celulosa. Esto lleva a cabo la generación de CO₂, CO y compuestos furánicos [12].

3.3 VIDA DEL TRANSFORMADOR DE POTENCIA Y VIDA DE SU AISLAMIENTO

El envejecimiento de los transformadores se recoge en las guías de carga del IEEE (Guide for loading mineral oil-immersed transformers) [2] e IEC (Loading guide for oil-immersed power transformers) [3]. La idea básica que mantienen estas guías data de hace más de 50 años. En ellas se describe como principal factor del envejecimiento, a la degradación térmica de las propiedades del papel aislante situado entre el devanado del transformador.

Además, la norma IEEE señala que debido a la gran cantidad de factores que causan el deterioro del aislamiento del transformador y que influyen en el efecto acumulativo de la temperatura, va a resultar muy difícil predecir con precisión la vida útil del aislamiento en condiciones normales y mucho menos en condiciones de servicio sujetas a cambios.

Tenemos que destacar que en dicha guía siempre que se utiliza el término “vida” se hace referencia a la vida acumulada del aislamiento y no a la vida real del transformador. La relación entre la vida del aislamiento y la del transformador es una incógnita todavía sin resolver, y estimar de forma absoluta, en años, la vida de un transformador se hace un tanto complicada, debido a que implica hacer muchas suposiciones [17].

3.3.1 Punto final de vida del transformador

El punto de final de vida del transformador de potencia se puede clasificar de la siguiente manera [17]:

- Final de vida técnico: ocurre cuando el transformador debería ser puesto fuera de servicio debido a razones técnicas, físicas o a un cierto debilitamiento de la integridad técnica del transformador.
- Final de vida estratégico: producido por cambios en la red. Estos cambios pueden ser en la cargabilidad y tensión de servicio; o en la variación de la capacidad de cortocircuito de transformadores viejos.
- Final de vida económico: se produce debido a condiciones económicas de la empresa a cargo del equipo. Este final de vida puede deberse a unas pérdidas elevadas o elevados costes de mantenimiento.

3.3.2 Punto final de vida del aislamiento

Los factores que van a determinar el criterio del final de vida del papel aislante son las características mecánicas del papel. Dado que el grado de polimerización (DP) está críticamente relacionado con la rigidez dieléctrica del papel, este se usará como criterio de final de vida.

Durante la fabricación de un transformador, el DP del papel se encuentra entre 1000 y 1300. Posteriormente este valor se reduce a 950 debido al secado del transformador y va a ir reduciéndose con el envejecimiento del transformador. Para valores entre 950-500, la rigidez mecánica es constante. Cuando el DP se reduce a unos valores comprendidos entre 500-200, la rigidez dieléctrica decrece en proporción directa al DP.

Por debajo de 150, la rigidez mecánica se reduce a 20% de su valor inicial y debajo de este valor el papel no tienen rigidez mecánica alguna, por lo que la industria considera que por debajo de un valor de 200, el papel pierde todas sus propiedades mecánicas y puede estar sujeto a daños (Figura 22) [17].

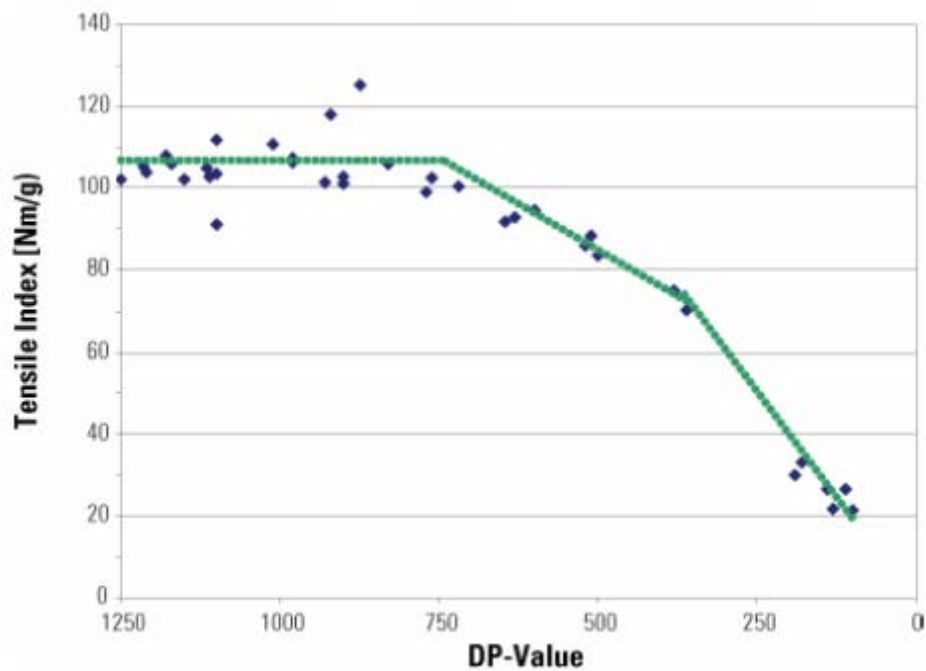


Figura 22: Evolución de la rigidez mecánica en función del grado de polimerización [12].

CAPÍTULO 4: MODELOS DE PÉRDIDA DE VIDA DEL TRANSFORMADOR DE POTENCIA.

Con los años, la industria de los transformadores ha buscado conseguir un valor numérico aproximado de la vida de un transformador, desarrollando tres métodos. Estos métodos son [17]:

- Las guías de carga.
- La obtención del DP de manera directa. (Este método es en el que se basa este trabajo de fin de grado.)
- La obtención del DP a partir del contenido de furanos en el aceite.

4.1 GUÍAS DE CARGA

Las guías de carga se han empleado como una referencia obligatoria para el cálculo de la vida del aislamiento del transformador.

Existen dos guías de carga principales, la guía de carga internacional (IEC) [3] y la guía de carga americana (IEEE) [2].

La guía IEC se aplica principalmente para los aislamientos de papel Kraft normal, que no están enriquecidos térmicamente. En esta guía la temperatura del punto caliente se limita a 98°C y la temperatura ambiente a 20°C. Por otro lado, en la guía IEEE se limita el punto caliente a 110°C y la temperatura ambiente a 30°C, ya que utiliza papel térmicamente mejorado (TUK).

Además, en la guía de carga IEEE se emplea el modelo de pérdida de vida de Arrhenius-Dakin y en la guía de carga IEC se emplea el modelo de pérdida de vida de Montsinger. A continuación se hablara sobre estos dos modelos [17].

4.1.1 Modelo de Arrhenius-Dakin

Este modelo se basa en la tasa de reacción química de Arrhenius y acepta que el envejecimiento debido a la fatigas, eléctrica, mecánica y del medioambiente no tienen un impacto importante en la vida del aislamiento durante la operación normal de servicio. Solo tiene en cuenta el efecto de la temperatura como factor de degradación del papel por lo que se le denomina, modelo de fatiga simple [17].

La ecuación de la vida según el modelo de Arrhenius-Dakin es:

$$Vida\ Remanente = L = Ae^{\frac{B}{T}}$$

Donde A= vida inicial y B=constante, dependen de la energía y la tasa de activación de una reacción química específica. T es la temperatura expresada en grados Kelvin.

La ecuación anterior también se suele representar de la siguiente manera:

$$\ln(L) = \ln(A) + \frac{B}{T}$$

Como se ha indicado anteriormente, este modelo solo se basa en la existencia de una reacción química principal. Pero en un transformador van a surgir otras reacciones químicas (hidrólisis, oxidación y pirólisis) dando como resultado un gráfico de Arrhenius no lineal (Figura 23).

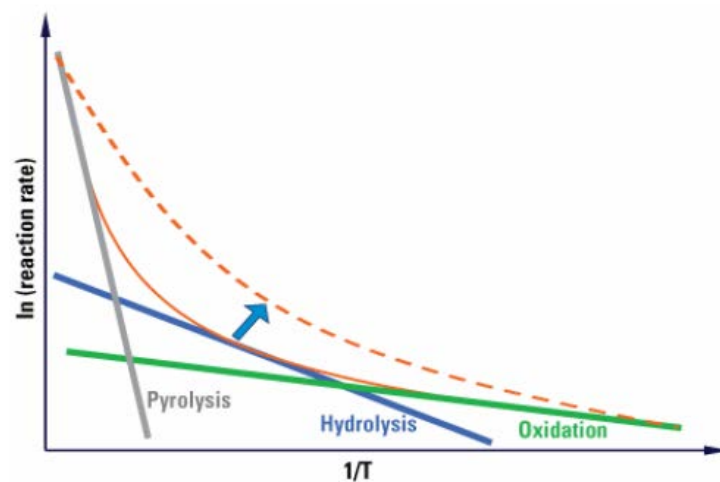


Figura 23: Reacción predominante en función de la inversa de la temperatura [12].

Esto dificulta la implementación de un modelo que describa la complejidad de los procesos de degradación. El proceso que dominará depende de la temperatura y la condición, es decir, el oxígeno, el agua y el contenido de ácido [17].

Este modelo permite conseguir una medida de la vida esperada de un material aislante a temperatura de operación normal [17].

Dado que no existe un valor de “vida absoluta”, en su lugar, en la guía IEEE se define “la vida por unidad”:

$$Vida(p.u) = 9,80 * 10^{-18} e^{\left[\frac{15000}{\theta_H + 273} \right]}$$

También se define el “factor de aceleración de envejecimiento”:

$$F_{AA} = e^{\left[\frac{15000}{383} - \frac{15000}{\theta_H + 273} \right]}$$

Donde θ_H es la temperatura en el punto más caliente.

Este valor de F_{AA} se usa para calcular el envejecimiento equivalente del transformador (F_{EQA}). F_{EQA} es la vida que será consumida en un periodo de tiempo dado (t) para el ciclo de temperatura dada. Se calcula de la siguiente manera:

$$F_{EQA} = (t)^{-1} \int_0^t F_{AA} dt = \left(\sum_{n=1}^N \Delta t_n \right)^{-1} \sum_{n=1}^N F_{AA,n} \Delta t_n$$

El porcentaje de pérdida de vida se calcula de la siguiente manera:

$$\% \text{ Pérdida de vida} = \frac{F_{EQA} \cdot t \cdot 100}{NIL}$$

Donde la vida normal del aislamiento (NIL) es un dato conocido que el usuario tiene la libertad de seleccionarlo por lo que no se define de manera única.

4.1.2 Modelo de Montsinger

Este modelo se basa en una regla empírica simple, en la cual el deterioro de las propiedades mecánicas se duplica por cada aumento de 6°C en la temperatura del punto más caliente sobre la temperatura base que la norma IEC define como 98°C.

$$\text{Tasa de Envejecimiento relativo} = V = 2^{\frac{\theta_H - 98}{6}}$$

La guía IEC define la pérdida relativa de vida de la siguiente manera:

$$L = \frac{1}{t} \int_{t_1}^{t_2} V dt = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N V$$

A continuación se muestra una gráfica (Figura 24) donde se compara los resultados obtenidos por las dos guías con el fin de hacer una posible comparación entre ambas. Para que ambos modelos sean comparables la temperatura base tiene que ser la misma, en este caso se igualó a 110°C . En todo caso en el gráfico también se muestra para una temperatura de 98°C . Como se puede observar, a temperaturas superiores a 115°C ambos modelos arrojan resultados distintos. Esto se debe a que cada guía elabora su modelo considerando papeles diferentes [17].

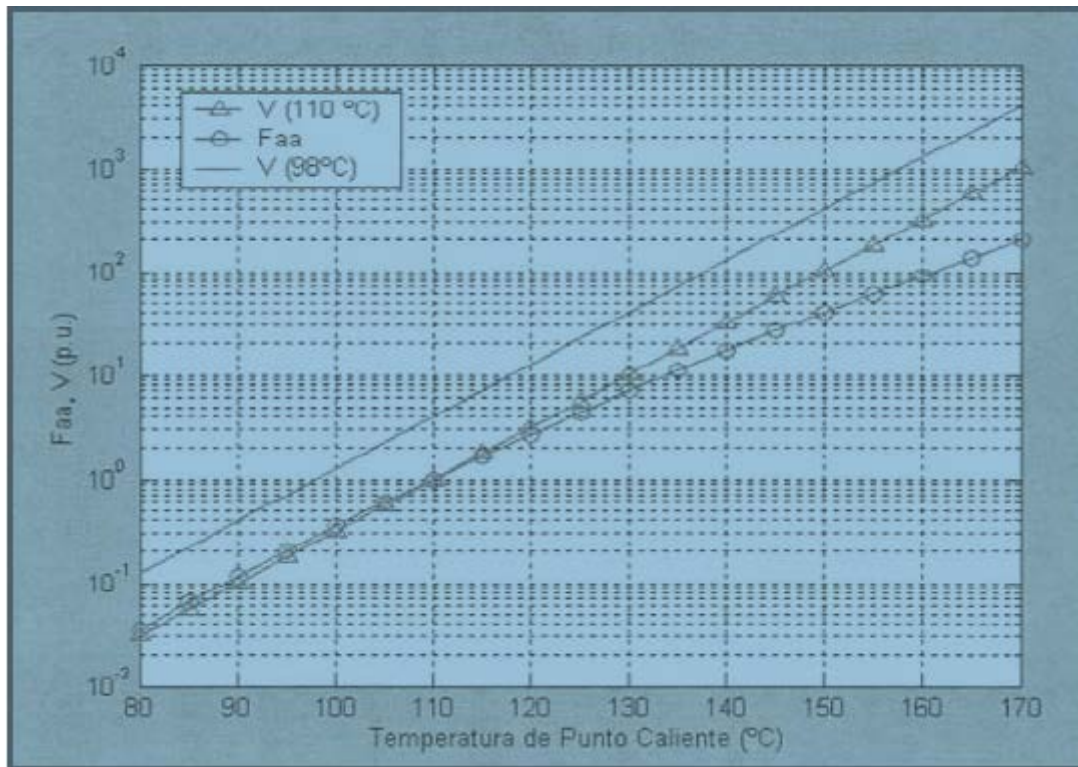


Figura 24: F_{aa} (IEEE) Y V (IEC) en función de la temperatura del punto caliente.

Estos modelos utilizados en las guías de carga, modelo de Arrhenius-Dakin y el modelo de Montsinger, arrojan unos valores de envejecimiento muy conservadores. Además, no consideran otros factores diferentes a la temperatura y en un transformador se van a producir diferentes reacciones anteriormente nombradas. Por este motivo aparecen otros modelos que permiten calcular el grado de polimerización del papel del transformador en lugar de la vida del papel.

4.2 OBTENCIÓN DEL DP DE MANERA DIRECTA

Como se ha comentado anteriormente, la operación continua de un transformador depende del estado del papel aislante. El estado del papel se cuantifica por su grado de polimerización (DP) o el número medio de enlaces de glucosa por macromolécula [5].

El DP de un papel recién fabricado esta normalmente alrededor de 1000. Este grado de polimerización va a ir reduciéndose con el envejecimiento del transformador hasta un valor de 200. A partir de este valor el papel se vuelve frágil y pierde toda su resistencia mecánica [5].

Factores como el oxígeno, la temperatura, el agua y los ácidos degradan el papel con el tiempo. Por tanto es necesario investigar como estos parámetros determinan la vida útil del transformador.

4.2.1 Modelo de Emsley

Emsley y Stevens mostraron en sus estudios que la mayoría de los datos sobre el envejecimiento de la celulosa pueden ser modelados por una ley de una reacción de orden cero. Esta ley de orden cero se representa por la ecuación de Ekenstam:

$$\frac{1}{DP_t} - \frac{1}{DP_0} = kt \quad (1)$$

Donde:

$-DP_t$, es el grado de polimerización en cualquier instante de tiempo.

$-DP_0$, es el grado de polimerización en el instante inicial.

$-k$, es la tasa de envejecimiento.

$-t$, es el tiempo.

De esta manera la tasa de envejecimiento se puede determinar a partir del gradiente de $\frac{1}{DP_t} - \frac{1}{DP_0}$ frente al tiempo.

Esta ecuación supone que la tasa de degradación de la celulosa es constante. Más tarde, Emsley observó que k no es constante y modeló los datos mediante una ley de reacción de primer orden:

$$\frac{1}{DP_t} - \frac{1}{DP_0} = \frac{k_{10}}{k_2} (1 - e^{(-k_2 t)}) \quad (2)$$

Emsley sugirió que la reducción en la tasa de envejecimiento es causada por una reducción en los reactivos y el peso molecular de la celulosa.

Además, también relaciona la tasa de reacción con la temperatura a través de la relación de Arrhenius:

$$k = Ae^{\frac{-E_a}{RT}} \quad (3)$$

Donde:

- E_a , es la energía de activación [J/mol].

-R, es la constante de los gases (8,314 J/molK).

-T, es la temperatura del papel en Kelvin.

Esta ecuación tiene una ventaja, y es que se refiere a los procesos de envejecimiento físicos, al tener en cuenta la energía de activación y la constante molar de los gases.

A depende del entorno químico del papel (agua, oxígeno y los ácidos) y se tiene que obtener para aplicar correctamente la ecuación.

Emsley sustituyó la ecuación (3) en la ecuación (1) para predecir el fin de la vida del papel y obtuvo la siguiente ecuación:

$$\frac{1}{DP_{\text{periodo de envejecimiento}}} - \frac{1}{DP_{\text{inicial}}} = A \times \text{periodo de envejecimiento} \times e^{\frac{-E_a}{RT}}$$

A continuación reorganizó esta ecuación para calcular el final de vida del papel para una temperatura dada:

$$\text{Vida esperada(años)} = \frac{\frac{1}{DP_{\text{final}}} - \frac{1}{DP_{\text{inicial}}}}{A \times 24 \times 365} \times e^{\frac{E_a}{RT}}$$

Tenemos que destacar que el valor de A no es constante durante toda la vida del transformador. A va a aumentar debido al agua y los ácidos, generados por las reacciones que se producen.

Debido a que A no va a ser constante, los valores de A tienen que ser determinados para todas las condiciones del agua y oxígeno del papel. De esta manera se podrá determinar un modelo dinámico que calcule la vida del aislamiento celulósico [5].

4.3 DETERMINACIÓN DE LOS PARAMETROS

Emsley realizó unos estudios previos donde determinó los valores de A y de la energía de activación. La energía de activación depende del tipo de celulosa y de la reacción química; y se calcula de forma gráfica representando el logaritmo de la constante de envejecimiento (k) frente a la inversa de la temperatura (1/T) hallando $(-E_a/R)$.

$$\ln(k) = \frac{-E_a}{R} \times \frac{1}{T} + \ln(A) \quad (4)$$

En 1994, Emsley [18] demostró mediante una serie de experimentos con diferentes condiciones que la energía de activación para el papel Kraft es 111 KJ/mol y es la misma para la hidrólisis y oxidación.

En 2004, Lundgaard [19] utilizó este valor de la energía de activación de 111 KJ/mol para calcular diferentes valores de A y compararlos con los valores de Emsley. Estos valores se muestran en la siguiente tabla 2:

Estado del papel	Datos de Emsley		Datos de Lundgaard
	A (h ⁻¹)	Límite de confianza 95%	A (h ⁻¹)
Limpio y seco	1,1E+08	(0,2 a 4,7)E+08	(2±0,5)E+08
1% agua	3,5E+08	(0,8 a 15)E+08	
1,5% agua			(6,2±2,9)E+08
2% agua	7,8E+08	(1,8 a 33)E+08	
4% agua (papel con oxígeno)	35E+08	(7,7 a 157)E+08	
4,1% agua			(21±7,8)E+08

Tabla 2: Valores de A calculados por Emsley y Lundgaard para diferentes humedades y una E_a de 111 KJ/mol.

En 2009, Lundgaard [20] demostró que la energía de activación depende de cada proceso, por lo tanto, es diferente para la oxidación y para la hidrólisis. Además, también va a depender del tipo de papel. En las tablas 3 y 4, se muestran los valores de A y de E_a para dos tipos de papel (papel Kraft y papel térmicamente mejorado “TUK”), donde se comprueba que los valores son diferentes. También se puede observar que el agua no afecta a la energía de activación para niveles menores del 3,5% de agua en el papel [5].

Parámetro	Seco y sin oxígeno	1,5% agua	3,5% agua
	Hidrólisis		
Ea (kJ/mol)	128	128	128
A (h ⁻¹)	4,1E+10	1,5E+11	4,5E+11

Tabla 3: Valores de A y Ea obtenidos por Lundgaard para la reacción de hidrólisis del papel Kraft.

Parámetro	Seco y sin oxígeno	1,5% agua	3,5% agua
	Hidrólisis		
Ea (kJ/mol)	86	86	86
A (h ⁻¹)	1,6E+04	3,0E+04	6,1E+04

Tabla 4: Valores de A y Ea obtenidos por Lundgaard para la reacción de hidrólisis del papel térmicamente mejorado.

4.4 ESTUDIOS DE LELEKAKIS

Las investigaciones previas, realizadas en recipientes sellados, para determinar el efecto del agua sobre el envejecimiento del papel aislante, sólo han considerado los niveles iniciales de agua. Pero estos niveles de agua van a cambiar durante el proceso de envejecimiento. La hidrólisis de la celulosa consumirá agua mientras que la degradación térmica y oxidativa del papel producirá agua. De este aspecto se dio cuenta Lelekakis e inició un estudio en el que quería determinar si manteniendo constante el contenido del agua en el papel mejoraba significativamente la tasa de envejecimiento [5].

Lelekakis y su equipo (Daniel Martín y Jaury Wijaya) de la Universidad de Monash, desarrollaron dos estudios sobre el envejecimiento del papel [5]:

- Para baja concentración de oxígeno (menos de 6000 ppm). Este estudio equivale a transformadores sellados en los que no existe intercambio de aire con el exterior.
- Para media (entre 7000 y 14000 ppm) y alta (mayor de 16000 ppm) concentración de oxígeno. Este estudio equivale a transformadores que intercambian aire con el exterior mediante un depósito de expansión.

4.4.1 Estudios para baja concentración de oxígeno

Para llevar a cabo estos estudios, el papel se envejeció y el aceite mineral fue secado y desgasificado. El envejecimiento del papel se produjo en recipientes colocados en un horno a la temperatura deseada donde se colocaron sondas de humedad para

controlar el contenido de agua del papel. El aceite primero fue secado y después desgasificado mediante vacío a una temperatura de 60°C [5].

El contenido de agua inicial del sistema se obtuvo acondicionando dos trozos de pressboard tipo K (3m de largo x 30 mm de ancho x 1mm de espesor) secándolos en un horno durante 3 horas. A continuación, estas muestras se colocaron sobre una balanza de laboratorio ya que el pressboard absorbe humedad del aire, para comprobar y medir el aumento de peso del pressboard debido a esta absorción de humedad del aire. Cuando el pressboard alcanzó el nivel deseado de humedad, se sumergió en aceite. Al sumergir el pressboard en el aceite, se produce un intercambio de agua entre el papel, el pressboard y el aceite hasta que se alcanza el equilibrio [5].

Las muestras de papel no fueron condicionadas antes de ser usadas de modo que mantenían su grado de polimerización inicial [5].

El contenido de agua del papel de cada experimento se deducía manteniendo una saturación relativa del contenido de agua del aceite del transformador ya que a temperatura constante, existe un equilibrio termodinámico entre la concentración de agua en el aceite y en el papel. Debido a este equilibrio, podemos calcular el contenido de agua del papel a partir de la saturación relativa del aceite [5].

La saturación relativa del aceite se controló y se ajustó para mantener un nivel constante de forma continua. En los experimentos donde se consumió agua, se añadieron cantidades medidas de agua para mantener el nivel constante. Y en los experimentos donde se producía agua, se utilizó el vacío para reducir el contenido de agua del aceite (y así el del papel), o se reemplazaron los pressboards por otros nuevos [5].

La concentración de oxígeno del aceite se midió usando un cromatógrafo de gas según las normas ASTM D3612. Y el grado de polimerización del papel se midió de acuerdo con ASTM D4243 [5].

4.4.1.1 Evolución del contenido del agua en el papel

A continuación se muestra el envejecimiento del papel Kraft (Figura 25) a lo largo del ensayo. En esta gráfica se puede ver la evolución del DP, para cada humedad y temperatura, frente al tiempo.

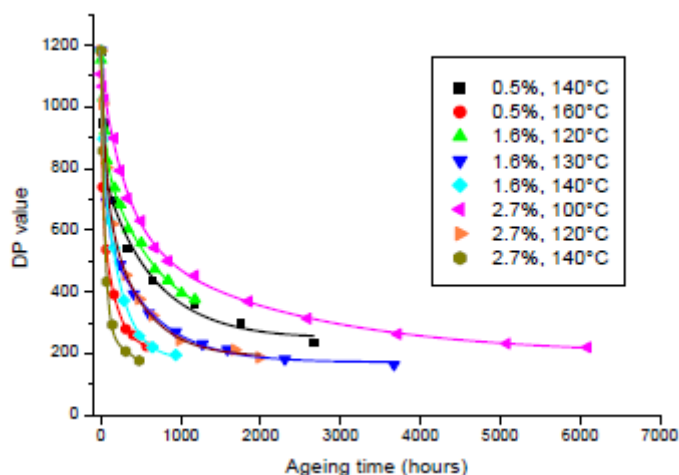


Figura 25: Evolución del DP del papel Kraft para diferentes niveles de temperatura y de humedad.

Se puede comprobar que un aumento de la humedad y/o temperatura produce un aumento de la tasa de degradación de la celulosa del papel. En el caso en el que la humedad era de 0,5% (Figura 26), se produce un aumento de la humedad a medida que envejece el papel, tanto a la temperatura de 140°C como a la de 160°C. Esto se puede deber a la pirólisis de la celulosa y también en menor cantidad, a la oxidación del aceite (W. Lampe and E. Spicar, 1976) [5].

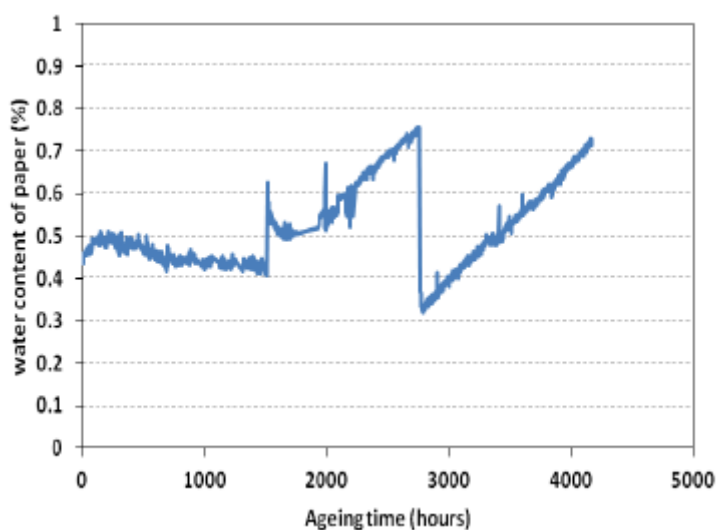


Figura 26: Evolución del contenido de agua para un con porcentaje de 0,5% de agua inicial, a 140°C y en baja concentración de oxígeno.

Sin embargo, cuando la humedad inicial era de 1,6% (Figura 27) y 2,7% (Figura 28), el contenido de agua del papel disminuyó. Esta disminución puede deberse a la hidrólisis de la celulosa ya que como vimos se consume una molécula de agua (W.Lampe and E.Spicar, 1976) [5].

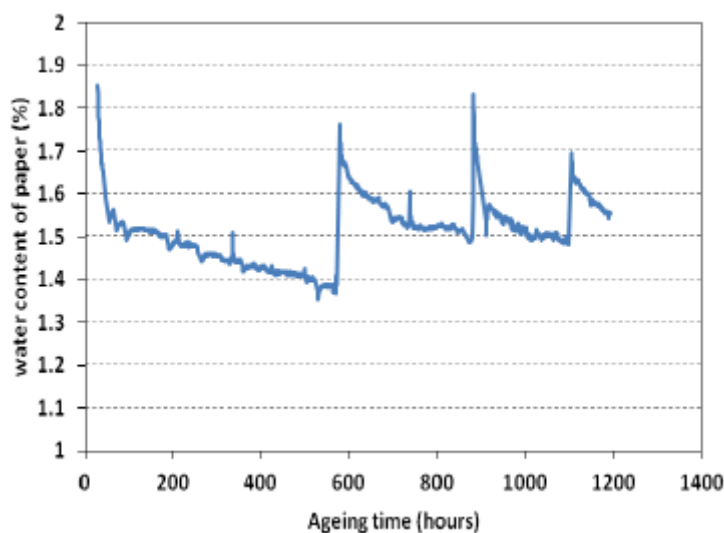


Figura 27: Evolución del contenido de agua para un porcentaje de 1,6% de agua inicial, a 120 °C y en baja concentración de oxígeno.

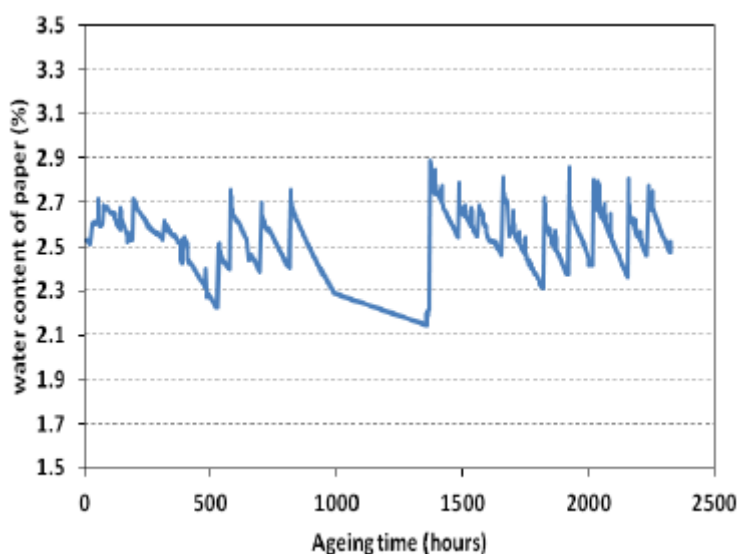


Figura 28: Evolución del contenido de agua para un porcentaje de 2,7% de agua inicial, a 120°C y en baja concentración de oxígeno.

Para los experimentos en los que el agua del papel disminuyó, se añadió agua al aceite para devolver el contenido de agua del papel hasta el nivel deseado. Y para los experimentos en los que aumentó el contenido del agua, se sustituyeron las muestras pressboard por otras para que absorbieran el agua y así se consiguiese el nivel de humedad deseado [5].

Aunque se sabe que se están produciendo cambios en el contenido de agua del papel, resulta difícil cuantificar el cambio debido al envejecimiento del papel, ya que algunos de estos cambios pueden haberse producido por pequeñas fugas en el sistema o a la hidrólisis y oxidación del pressboard [5].

En la figura 29 se hablará de la evolución del oxígeno en el aceite. Como se puede comprobar, parte del oxígeno inicial fue consumido por la oxidación del aceite y del papel, provocando que se conservase bajo durante el resto de la prueba.

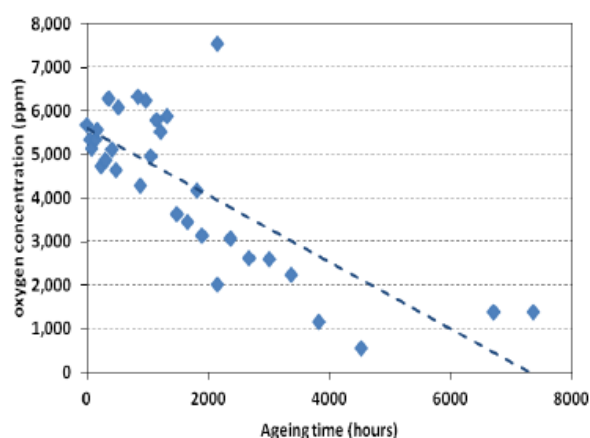


Figura 29: Evolución del oxígeno en el aceite.

4.4.1.2 Cálculo de la tasa de envejecimiento (k)

Como ya se ha indicado anteriormente, Emsley sugirió que la reducción en la tasa de envejecimiento, cuando el DP es menor de 200, es causada por una reducción en el peso molecular de la celulosa y una reducción en los reactivos. Además, Emsley y Lundgaard informaron que las isothermas son lineales en la región $(\frac{1}{DP_t} - \frac{1}{DP_0}) \times 1000 < 5$ (es decir $DP > 200$). Pero al mantener las condiciones del experimento, al contrario que el recipiente sellado, se encontró que las isothermas no son lineales, por lo que la ecuación de orden cero de Ekenstam no puede ser utilizada para un modelo preciso de cada reacción. Sin embargo, mediante una extrapolación lineal de los datos se pueden comparar los valores de A y de Ea con los obtenidos por Emsley y Lundgaard [5].

Las tasas de envejecimiento determinadas a partir de $(\frac{1}{DP_t} - \frac{1}{DP_0})$ frente al tiempo se muestran en la tabla 5:

	Humedad (%)		
Temperatura (°C)	0,5	1,6	2,7
100			0,62E-06
120		1,48E-06	2,40E-06
130		2,32E-06	
140	1,21E-06	5,79E-06	12,84E-06
160	6,18E-06		

Tabla 5: Tasa de envejecimiento para papel Kraft a diferentes niveles de humedad y temperatura.

El grado de polimerización expresado como $(\frac{1}{DP_t} - \frac{1}{DP_0})$ frente al tiempo se muestra en la siguiente gráfica (Figura 30):

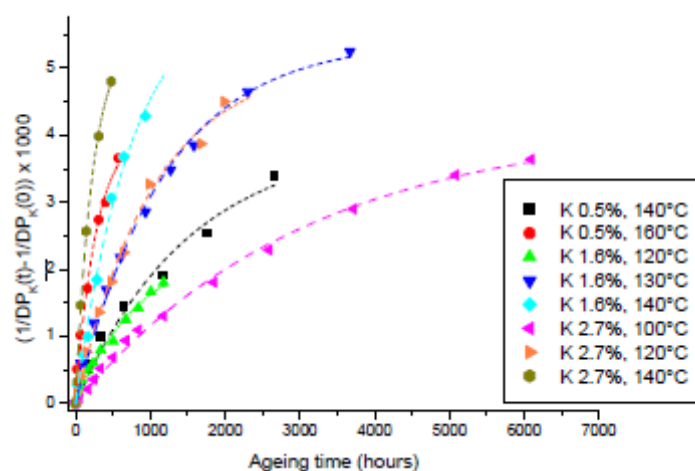


Figura 30: $(\frac{1}{DP_t} - \frac{1}{DP_0})$ frente al tiempo para papel Kraft.

4.4.1.3 Cálculo de las energías de activación

Las energías de activación fueron determinadas utilizando las tasas de envejecimiento de la tabla 5. Para ello, se representó el $\ln(k)$ frente a la inversa de la temperatura ($1/T$) (Figura 31). Después, hay que multiplicar el gradiente ($-E_a/R$) por 8,314 (la constante molar de los gases) para obtener la energía de activación [5].

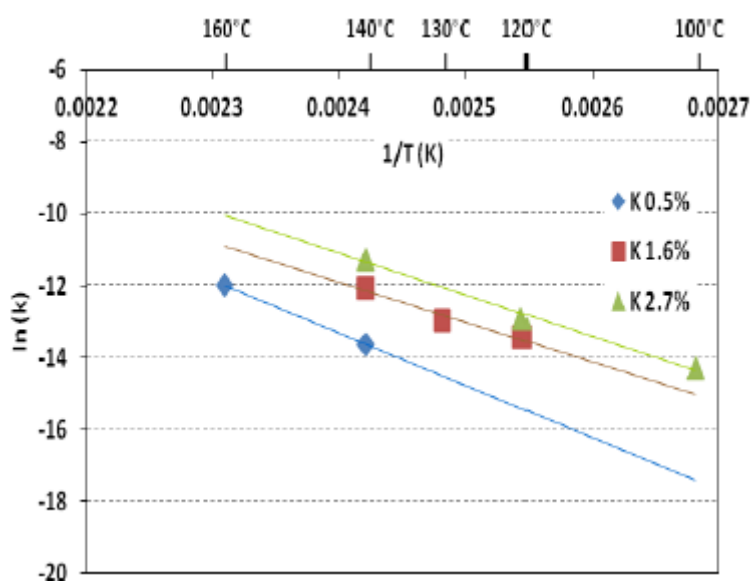


Figura 31: Tasa de envejecimiento (k) en función de la inversa del tiempo para papel Kraft.

En la tabla 6 se muestran las diferentes energías de activación calculadas a partir de la gráfica (Figura 31). La media de los valores obtenidos se aproxima a 111 KJ/mol. Valor que obtuvo Emsley [5].

4.4.1.4 Cálculo de los valores de A

El valor de A se obtiene a partir de la gráfica representada anteriormente en la figura 31, ya que según la ecuación (4), la intersección de esa gráfica con el eje de abscisas nos dará el valor de A [5].

La tabla 6 muestra los valores de A y Ea:

Humedad (%)	Ea (kJ/mol)	A (h^{-1})	Valor de A tomando Ea=111 kJ/mol
0,5	121	2,58E+09	1,42E+08
1,6	92	2,19E+06	6,80E+08
2,7	97	1,99E+07	1,65E+09
Valor medio de Ea	103		

Tabla 6: Valores de A y Ea determinados para diferentes contenidos de agua en el papel Kraft en baja concentración de oxígeno.

Para comparar los valores de A con los obtenidos por Emsley y Lundgaard, se recalcularon los valores de A usando una energía de activación de 111 KJ/mol y los ratios de las reacciones determinados a partir de los datos experimentales. Estos valores se muestran en la tabla anterior (Tabla 6) y se representan gráficamente en la figura 32 [5]:

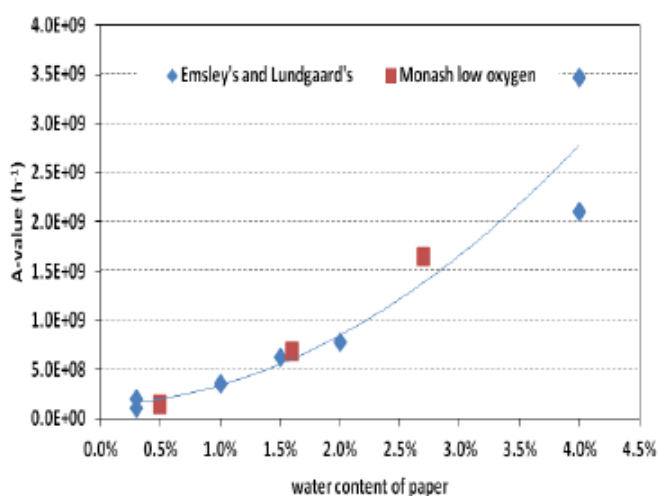


Figura 32: Comparativa de los valores de A obtenido por Emsley, Lundgaard y el equipo de Lelekakis (Monash).

El recalculado de los valores de A para una humedad menor del 2% son de la misma magnitud que los investigadores anteriores. El valor obtenido por encima del 2,7 % de humedad, aclara la incertidumbre que existía previa a este experimento por encima de una humedad de 2% y nos indica que la relación del valor de A y el contenido de agua del papel no es lineal [5].

4.4.1.5 Dependencia del valor A con la cantidad de oxígeno en el aceite

La segunda parte del estudio de Lelekakis refleja la dependencia del valor A con la cantidad de oxígeno en el aceite.

En esta parte se va a demostrar que el valor de A depende también del contenido de oxígeno en el aceite.

Lelekakis utilizó para ello, los valores de A determinados por su equipo de investigadores de la Universidad de Monash para una concentración de 0,5%, 1,6% y 2,7%; y los valores determinados por Emsley y Lundgaard. Como se ha indicado antes, el valor de A depende del contenido de oxígeno, y como Emsley utilizó diferentes condiciones de oxígeno para obtener los valores de A para un contenido de agua del 4% y del 2%, Lelekakis los elimina de su estudio (Figura 33) [5].

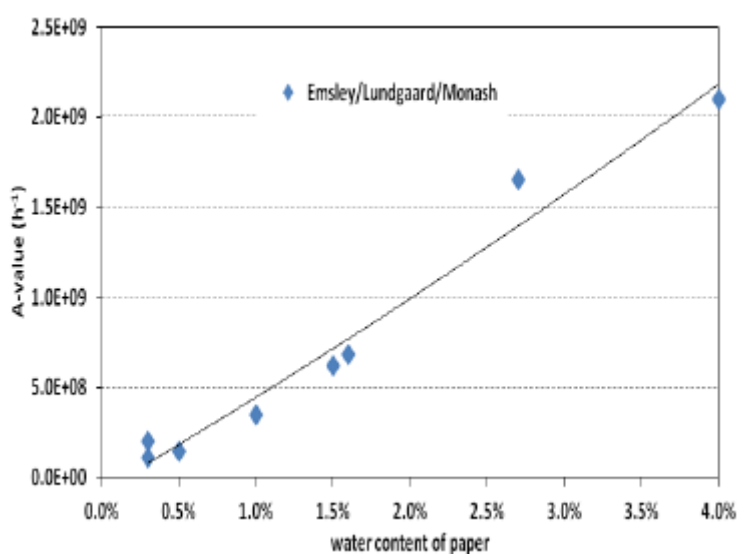


Figura 33: Valores de A frente a la humedad, obtenidos por Emsley, Lundgaard y Monash.

En esta gráfica se puede ver que los datos se ajustan muy bien a una función polinómica con $R^2=0,9742$. Sin embargo, si se elimina el valor de A obtenido por Lundgaard para 0,3% y 4% y se mantiene el valor de Monash para 2,7%, se puede conseguir un ajuste mejor con un $R^2=1$ (Figura 34).

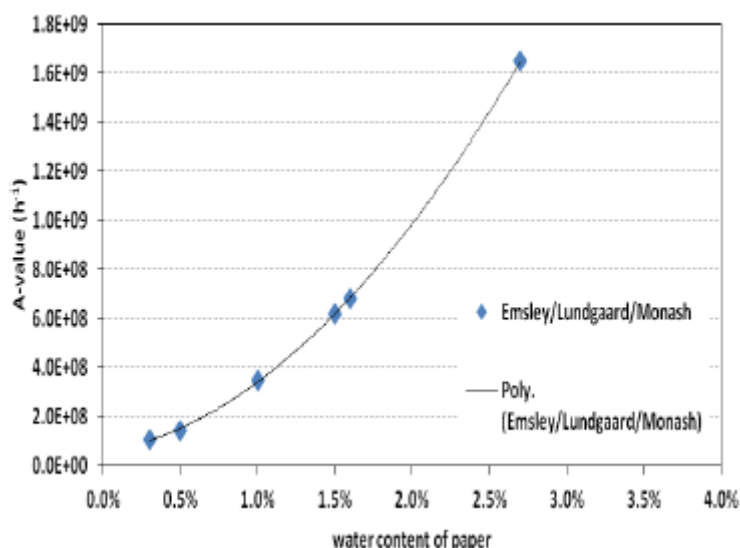


Figura 34: Valores de A frente a la humedad, obtenidos por Emsley, Lundgaard y Monash (Ajuste $R^2=1$).

Por lo que Lelekakis llegó a una conclusión. Manteniendo la humedad del papel, se mejora la precisión en el cálculo de los valores de A y de Ea.

De esta manera el valor de A para cualquier humedad para bajos niveles de oxígeno se puede determinar mediante la siguiente ecuación:

$$Y = (1,78E + 12)X^2 + (1,10E + 10)X + 5,28E + 0,7$$

Donde:

- Y, es el valor de A.
- X, es el valor de agua contenido en el papel.
- E, es la energía de activación.

4.4.1.6 Curvas de vida para un contenido de oxígeno bajo

Estas curvas muestran el tiempo (en años) que se necesitaría para que el papel se degrade desde un valor inicial de DP de 1000 hasta un valor de 200.

La figura 35 muestra las curvas de vida para niveles bajos de oxígeno obtenidas por Lundgaard. Estas curvas se construyeron utilizando los valores de A para una concentración de 1%, 3%, y 4% de humedad en el papel, obtenidos por Emsley y los valores de A, para un contenido de 1,5% y 2% de humedad en el papel, obtenidos por Lundgaard [5].

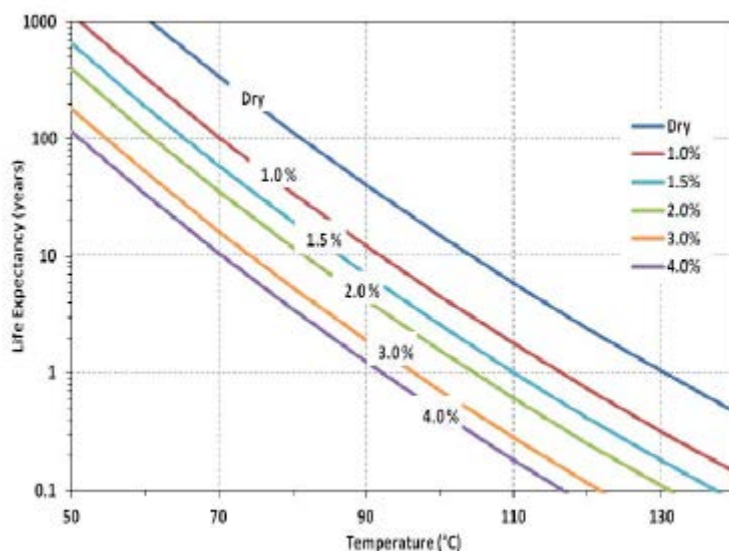


Figura 35: Curvas de vida para papel Kraft para baja concentración de oxígeno combinando los valores de A de Emsley y Lundgaard.

En la figura 36 se muestran las curvas de vida obtenidas por Lelekakis, utilizando una combinación de los diferentes valores de A aportados por los diferentes investigadores. Los valores de concentración de agua de 0,3% y 1% en el papel, son de Emsley. De Lundgaard se usan los valores de 1,5% de concentración de agua y de Monash se utilizan los valores de A obtenidos para concentraciones de agua de 0,5%, 1,6% y 2,7% [5].

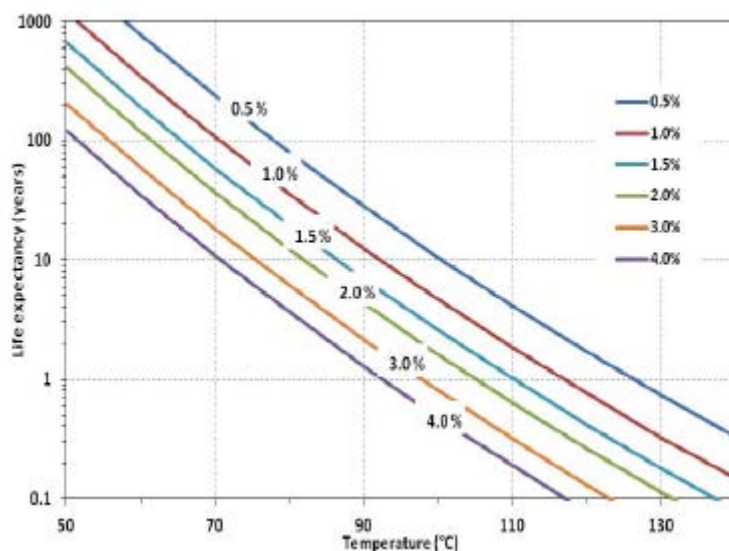


Figura 36: Curvas de vida para papel Kraft para baja concentración de oxígeno combinando los valores de A de Emsley, Lundgaard y Monash.

Las diferencias entre la vida calculada utilizando las curvas de la figura 35 y las de la figura 36 pueden llegar a ser importantes en el caso de humedades bajas y temperaturas reducidas, como se observa en la tabla 7.

Tem (°C)	1.0 %	1.5 %	2.0 %	3.0 %	4.0 %
50	30.3 years	1.1 years	15.6 years	24.4 years	4.4 years
60	8.8 years	0.3 years	4.5 years	7.1 years	1.3 years
70	2.7 years	36.1 days	1.4 years	2.2 years	0.4 years
80	0.90 years	12.0 days	0.5 years	0.7 years	47.8 days
90	116.5 days	4.2 days	59.9 days	93.7 days	16.9 days
100	43.5 days	1.6 days	22.4 days	34.9 days	6.3 days
110	17.1 days	14.9 hours	8.8 days	13.7 days	2.5 days
120	7.0 days	6.1 hours	3.6 days	5.7 days	1.0 days
130	3.0 days	2.6 hours	1.6 days	2.4 days	10.5 hours
140	1.4 days	1.2 hours	16.8 hours	1.1 days	4.7 hours

Tabla 7: Diferencias entre la vida calculada utilizando la figura 35 y la calculada utilizando la figura 36.

4.4.1.7 Conclusiones

A continuación se muestra un breve resumen de las conclusiones a las que llegó Lelekakis [5] durante su estudio:

- La tasa de envejecimiento (k) no es constante cuando se mantuvo el contenido de agua del papel. Las isotermas de envejecimiento no son lineales en la región $(\frac{1}{DP_t} - \frac{1}{DP_0}) \times 1000 < 5$ (es decir $DP > 200$). Se usaron reacciones de orden cero para comparar los resultados con los obtenidos previamente por otros investigadores, sin embargo, se comprobó que las reacciones de orden uno se ajustaban mejor a los resultados.
- La correlación entre el valor de A y el contenido de agua del papel no es lineal. Se obtuvieron los valores de A y su dependencia con el agua para papel Kraft.
- Manteniendo el contenido de agua del papel durante los experimentos de envejecimiento se traduce en un aumento de la esperanza de vida del papel.

4.4.2 Estudios para media y alta concentración de oxígeno

Los experimentos de envejecimiento se llevaron a cabo con contenidos de oxígeno medio (7000-14000 ppm) y alto (16500-25000 ppm). Estos experimentos se realizaron utilizando el mismo método descrito en el apartado anterior [6].

El contenido de agua del papel se controló a tres niveles de 0,5%, 1,6% y 2,7% ; y las temperaturas a las que se llevaron a cabo los experimentos, se encontraban entre 100°C y 160°C [6].

A continuación se muestra el envejecimiento del papel Kraft a lo largo del ensayo. Los cambios del DP para cada humedad y para cada temperatura se muestran en las siguientes gráficas:

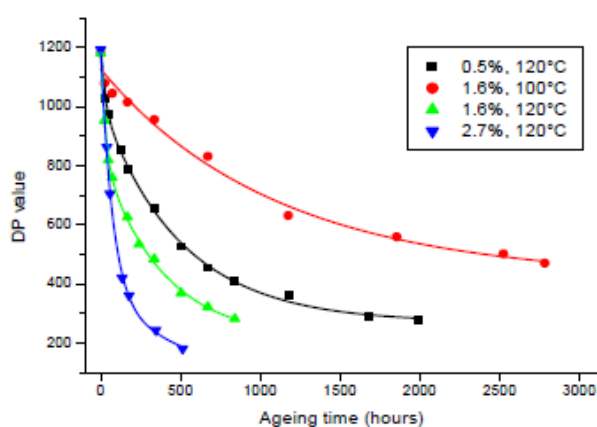


Figura 37: Evolución del DP para papel Kraft para una concentración de oxígeno media (7000-14000 ppm).

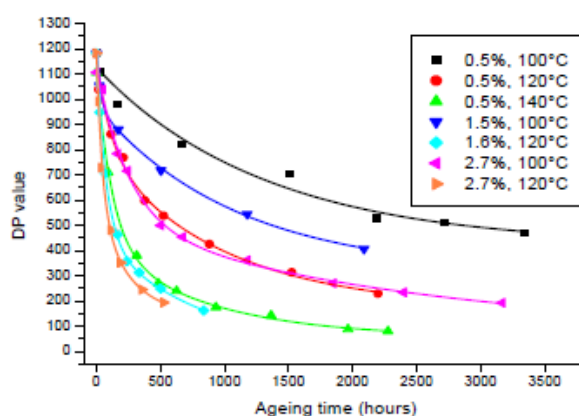


Figura 38: Evolución del DP para papel Kraft para una concentración de oxígeno alta (16500-25000 ppm).

Se puede observar que el envejecimiento del papel se incrementa con la concentración del agua. Además, el aumento en el contenido del oxígeno del aceite produce un

aumento en la tasa de envejecimiento del papel con un mismo contenido de agua y a una misma temperatura [6].

El contenido de agua del papel se incrementó para la mayoría de los experimentos. Esto se debe a la degradación oxidativa de la celulosa ya que produce agua. Además, la oxidación del aceite produce agua y ácidos de bajo peso molecular que como vimos en apartados anteriores, se convierten en catalizadores para la hidrólisis de la celulosa. Esta oxidación del aceite se reflejó en el cambio de color del aceite que se volvió más oscuro. También, este aumento del contenido del agua se debe a la oxidación del pressboard que se utiliza para condicionar el contenido de agua del papel [6].

Como en el experimento para baja concentración de oxígeno, para los experimentos en los que el agua del papel disminuyó, se añadió agua al aceite para devolver el contenido de agua del papel hasta el nivel deseado. Y para los experimentos en los que aumentó el contenido del agua, se sustituyeron las muestras pressboard por otras para que absorbieran el agua o mediante la aplicación de vacío en el aceite, y así se consiguiese el nivel de humedad deseado.

Para comparar los valores de A y Ea obtenidos en este estudio con los obtenidos por Emsley y Lundgaard para papel seco con alto contenido de oxígeno, se utilizó la ecuación de orden cero de Ekenstam:

$$\frac{1}{DP_t} - \frac{1}{DP_0} = kt$$

Las tasas de envejecimiento (k) determinadas a partir de las gráficas $\frac{1}{DP_t} - \frac{1}{DP_0}$ frente al tiempo se muestran en las tablas (8 y 9):

	Humedad (%)		
Temperatura (°C)	0,5	1,6	2,7
100		0,45E-06	
120	1,41E-06	3,10E-06	9,05E-06

Tabla 8: Tasa de envejecimiento para papel Kraft con una concentración de oxígeno media (7000-14000 ppm).

	Humedad (%)		
Temperatura (°C)	0,5	1,6	2,7
100	0,38E-06	0,74E-06	1,34E-06
120	1,53E-06	6,19E-06	8,31E-06
140	5,38E-06		

Tabla 9: Tasa de envejecimiento para papel Kraft con una concentración de oxígeno alta (16500-25000 ppm).

Gráficas $\left(\frac{1}{DP_t} - \frac{1}{DP_0}\right)$ frente al tiempo para media (Figura 39) y alta (Figura 40) concentración de oxígeno:

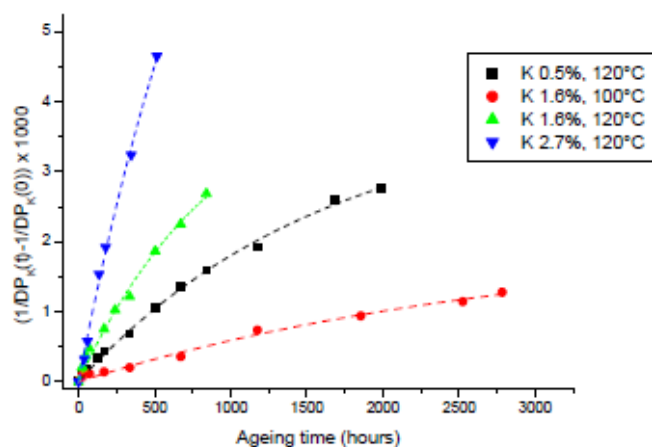


Figura 39: $\left(\frac{1}{DP_t} - \frac{1}{DP_0}\right)$ frente al tiempo para papel Kraft para una concentración de oxígeno media (7000-14000 ppm).

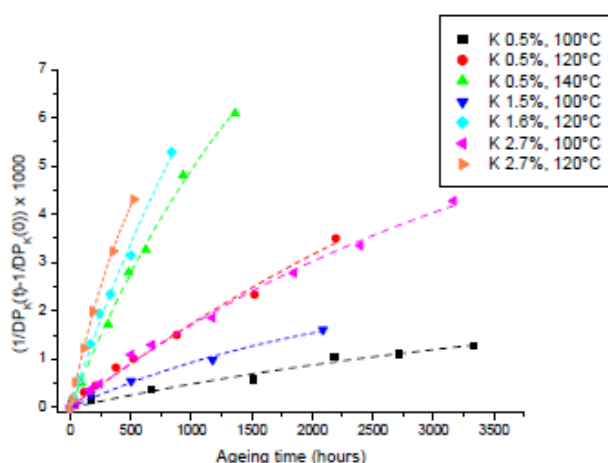


Figura 40: $\left(\frac{1}{DP_t} - \frac{1}{DP_0}\right)$ frente al tiempo para papel Kraft para una concentración de oxígeno alta (16500-25000 ppm).

En las tablas 8 y 9, se puede observar que las tasas de envejecimiento para concentraciones altas de oxígeno son mayores que para las concentraciones medias de oxígeno, para concentraciones de 0,5% y 1,6% de contenido de agua en el papel. Sin embargo, cuando la concentración es de 2,7 % y la temperatura de 120°C la tasa de envejecimiento es menor en concentraciones altas de oxígeno [6].

Como se puede ver en las gráficas anteriores (Figura 39 y 40), las isotermas no son lineales por lo que una reacción de primer orden sería más precisa para el modelado de la reacción.

$$\frac{1}{DP_t} - \frac{1}{DP_0} = \frac{k_{10}}{k_2} (1 - e^{(-k_2 t)})$$

Los coeficientes k_{10} y k_2 se dan en las siguientes tablas 10 y 11:

	Humedad (%)					
Temperatura (°C)	0,5		1,6		2,7	
	k_{10}	K_2	k_{10}	K_2	k_{10}	K_2
95,5			6,90E-07	3,40E-04		
120	2,41E-06	6,10E-04	4,76E-06	1,06E-03	1,13E-05	9,50E-04

Tabla 10: $(\frac{1}{DP_t} - \frac{1}{DP_0})$ frente al tiempo para papel Kraft con una concentración de oxígeno media (7000-14000 ppm).

	Humedad (%)					
T (°C)	0,5		1,6		2,7	
	k_{10}	K_2	k_{10}	K_2	k_{10}	K_2
100	5,40E-07	2,10E-04	1,14E-06	4,20E-04	1,94E-06	2,60E-04
120	1,90E-06	1,90E-04	7,77E-06	5,60E-03	1,21E-05	1,57E-03
140	6,33E-06	5,30E-04				

Tabla 11: $(\frac{1}{DP_t} - \frac{1}{DP_0})$ frente al tiempo para papel Kraft y con una concentración de oxígeno alta (16500-25000 ppm).

Los valores de A y de Ea se calculan como en el apartado anterior, representando el $\ln(k)$ frente a la inversa de la temperatura (figuras 41 y 42) se muestran en la tabla 12.

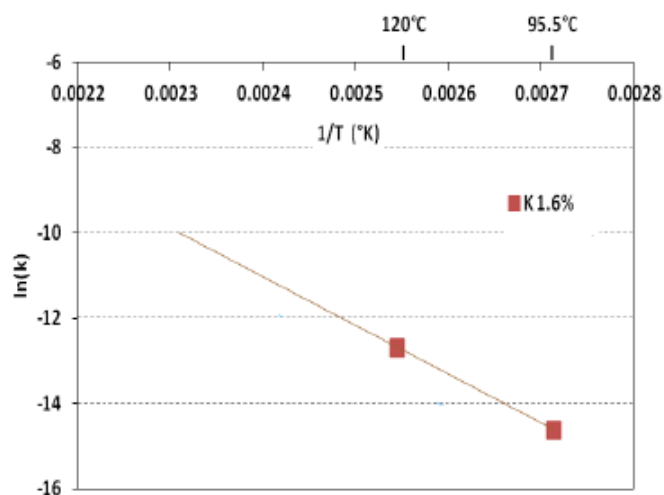


Figura 41: Tasa de envejecimiento (k) en función de la inversa del tiempo para papel Kraft con contenido de oxígeno medio. Figura modificada del texto original [6].

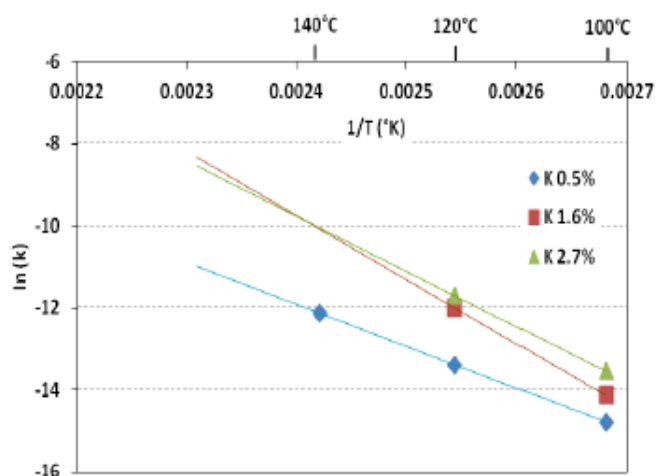


Figura 42: Tasa de envejecimiento (k) en función de la inversa del tiempo para papel Kraft con contenido de oxígeno alto.

Humedad (%)	Oxígeno	Ea (kJ/mol)	A (h ⁻¹)	Valor de A recalculado con Ea=111 kJ/mol
1,6	Medio	118	1,52E+10	1,66E+09
0,5	Alto	85	2,66E+10	9,33E+08
1,6	Alto	130	1,04E+12	3,05E+09
2,7	Alto	111	5,36E+09	4,70E+09

Tabla 12: Valores de A y de Ea para papel Kraft con un contenido oxígeno media y alta.

Comparando los valores de A para una concentración media y alta de oxígeno, se puede comprobar que los valores de A aumentan con el agua y con el contenido del oxígeno [6].

En la siguiente gráfica (Figura 43) se muestra una comparación de los valores de A para una concentración de oxígeno baja (experimento anterior), media y alta:

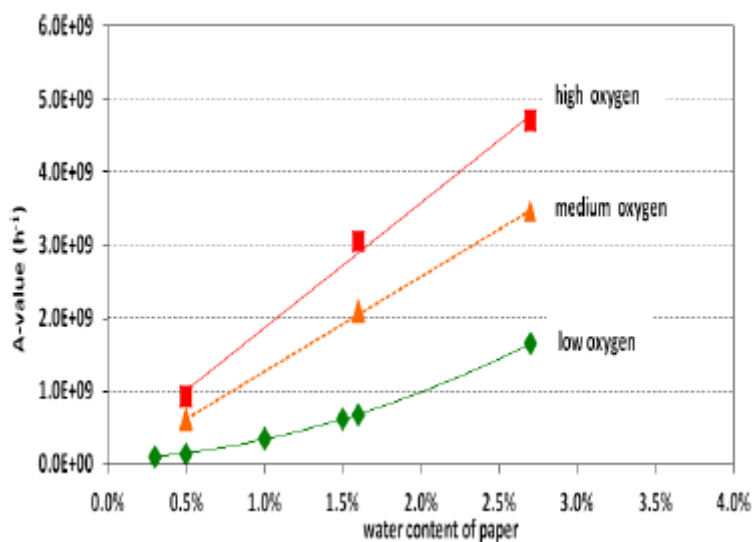


Figura 43: Valores de A para papel Kraft en bajo, medio y alto contenido de oxígeno frente a la humedad.

El valor de A aumenta con el contenido de agua del papel y la concentración de oxígeno del aceite. Esta concentración de oxígeno del aceite va a tener un efecto mayor en los valores de A que el agua.

Se elaboraron las curvas de vida con una concentración media (Figura 44) y alta (Figura 45) de oxígeno a partir de los valores de A obtenidos por la Universidad de Monsah y se realizó una comparación de las diferentes curvas de vida para una concentración de agua en el papel de 1,6% para las diferentes concentraciones de oxígeno (Figura 46) [6].

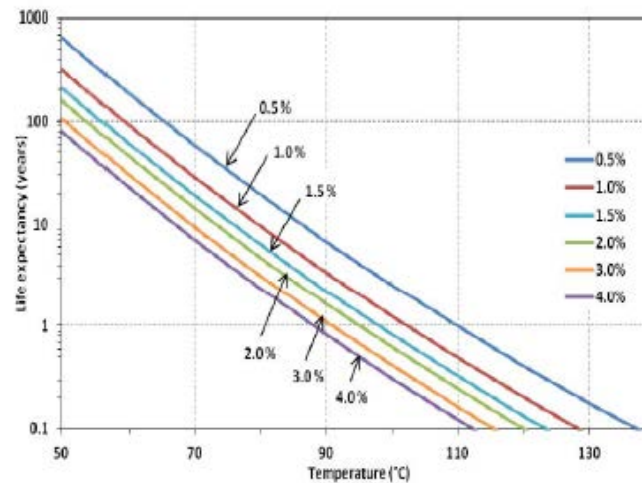


Figura 44: Curvas de vida para papel Kraft con contenido medio en oxígeno obtenidas utilizando los valores de A obtenidos por Lelekakis.

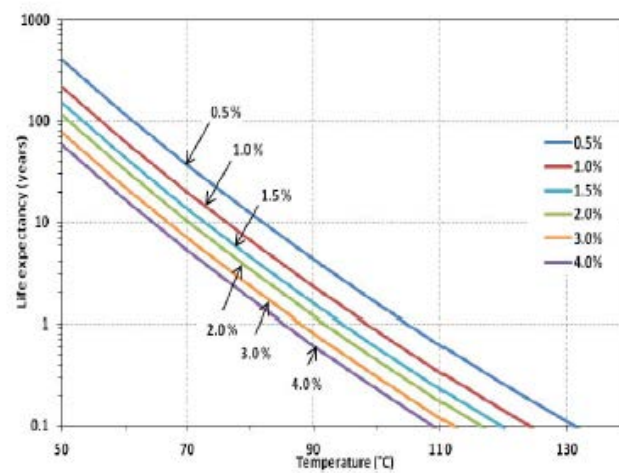


Figura 45: Curvas de vida para papel Kraft con contenido alto en oxígeno obtenidas utilizando los valores de A obtenidos por Lelekakis.

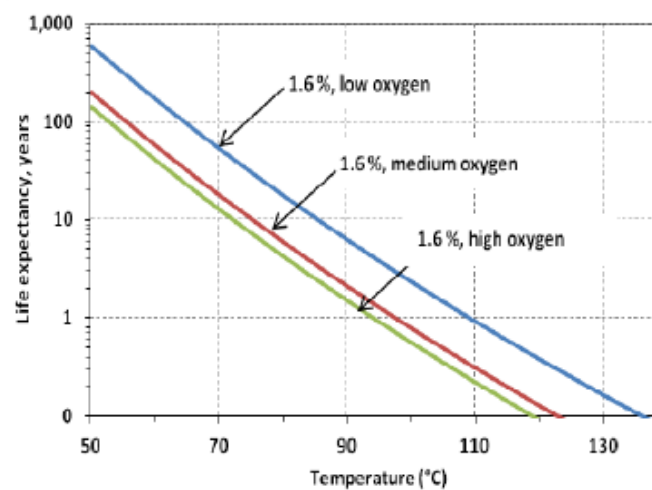


Figura 46: Comparación de la esperanza de vida del papel Kraft con una concentración de agua de 1,6% para bajo, medio y alto concentración de oxígeno.

En la figura 46, se puede comprobar que la vida del papel disminuye al aumentar el contenido del oxígeno en el aceite, por lo que debería reducirse para aumentar la esperanza de vida del papel [6].

4.4.2.1 Conclusiones

A continuación se muestra un breve resumen de las conclusiones a las que llegó Lelekakis [6] durante su estudio para media y alta concentración en oxígeno:

- La tasa de degradación del papel no es constante. No sigue un modelo lineal por lo que para modelar con mayor precisión la caída del DP en el tiempo es preciso utilizar una reacción de primer orden.
- Se llevaron a cabo relaciones entre el valor de A, el contenido de agua del papel y el contenido de oxígeno del aceite. El valor de A se ve influenciado por el contenido de oxígeno en el aceite, teniendo un mayor efecto en A que el contenido de agua. La vida del papel se acorta con el aumento de oxígeno disuelto en el aceite.

CAPÍTULO 5: PROGRAMA DESARROLLADO

El programa desarrollado consiste en una aplicación informática que integra un ejecutable de Matlab y un libro Excel, desde el cual, se exportan los datos seleccionados previamente, mediante una Macro programada en este libro Excel, al ejecutable de Matlab. En el libro Excel se encuentran almacenados los resultados de los ensayos de envejecimiento.

La aplicación trabaja con una reacción de envejecimiento de orden cero que corresponde a la siguiente ecuación:

$$\frac{1}{DP_t} - \frac{1}{DP_0} = kt$$

Siendo

$$k = Ae^{\frac{-E_a}{RT}}$$

En dicho programa, se ha tomado la energía de activación (E_a) con un valor de 111 kJ/mol y la constante universal de los gases (R), se toma como 8,31434 J/Kmol.

El ejecutable Matlab tiene cuatro funciones:

- La primera función calcula los valores máximo, mínimo y mediana de la tasa de envejecimiento para cada temperatura y para cada humedad de los ensayos realizados.
- La segunda función representa la evolución de $(\frac{1}{DP_t} - \frac{1}{DP_0})$ en el tiempo. Ajusta esta evolución a una ecuación de orden cero y muestra la ecuación de Emsley de degradación del papel, calculando los valores de k y A de esta ecuación para cada condición de humedad y temperatura.
- La tercera función parte de los datos obtenidos con la función anterior. Esta función muestra de forma gráfica la evolución de los valores de A con la humedad y la ecuación que describe dicha evolución.
- La cuarta función parte de los datos obtenidos en la segunda función. Esta función muestra de forma gráfica la evolución del $\ln(k)$ frente a la inversa de la temperatura ($1/T$) y calcula la energía de activación. Además, muestra la dependencia de los valores de la energía de activación con la humedad.

5.1 DATOS DEL PROGRAMA DESARROLLADO

Los datos utilizados en el programa se han obtenido a través de una serie de ensayos de envejecimiento de papeles con diferentes contenidos de humedad y a diferentes temperaturas en el departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Carlos III de Madrid. Los ensayos realizados, un total de 11 ensayos, se muestran en la siguiente tabla:

Temperatura del ensayo	Humedades				
110°C	0,11%	1,01%	1,94%	2,92%	
120°C	0,89%	1,03%		2,47%	4,28%
130°C		1,01%	1,94%	2,92%	

Tabla 13: Experimentos de envejecimiento de papeles aislantes realizados en la Universidad Carlos III.

Para realizar estos ensayos se introdujeron en un horno a la temperatura de cada ensayo, una serie de viales, cada uno preparado con un papel que contenga la humedad inicial deseada. Los viales se colocaron en diferentes baldas (Figura 47).

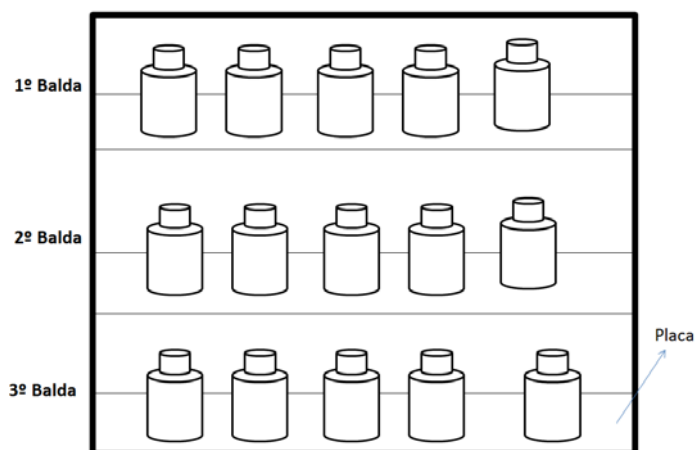


Figura 47: Colocación de los viales para una temperatura de ensayo de 120°C.

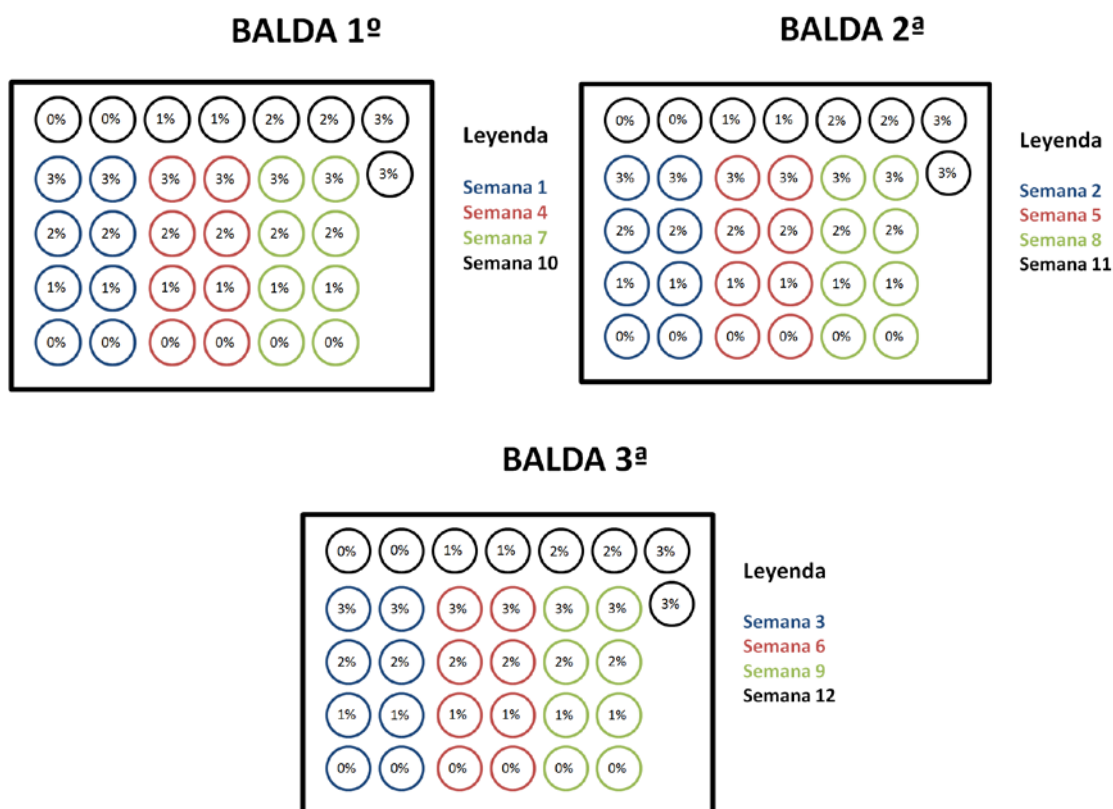


Figura 48: Colocación de los viales para una temperatura de ensayo de 120°C vista desde arriba.

Cada semana se extraía una muestra de papel de cada pareja de valores (T, H) y se medía el contenido de humedad del papel, el contenido de humedad del aceite, la acidez del aceite, el grado de polimerización del papel y el oxígeno disuelto en el aceite.

Los resultados de los ensayos se recogieron en una hoja de Excel de la forma indicada en la figura 49:

Pulse para exportar los datos a la plantilla.																			
ENSAYOS EN PAPEL																			
EJERCICIOS																			
Humedad	2FAI ppm	DPV	TEMPERATURA (°C)	Horas	AGUA	O2	N2	CH4	CO	CO2	C2H6	C2H2	% GAS	CU	AGUA2	DP	2FAI	SHMF	
1.01	1183	130	1			6.947	72566	232	248	5425	10.97	379	0	8.58	0.17	7034	842	4.9502558	0.6718991
1.01	0	842	130	168	2.95	1.978	53429.49	267.07	278.36	6199.79	12.49	388.53	0	6.43	0.15	3876	794	13.45	2.83
1.01	0.2	794	130	336	2.45	8.075	68703	430	263	8786	21.82	933	0	7.78	0.19	8912	632	21.36	6.77
1.01	0.6	630	130	504	2.45	6.049	64446	339	481	10161	21.19	534	0	8.22	0.13	3505	610		
1.01	0.9	540	130	672	1.9	6.644	64363	494	363	9492	21.63	1027	0	8.24	0.15	13106	540		
1.01	1.071	472	130	1008	2.9	2.961	73386	585	597	9730	25.07	1067	0	10.72	0.5	9545	471		
1.01	0.2	718	130	1	6.05	15.109	67918	132	105	8891	11.37	365	0	9.25	0.13	21514	718	7.1343178	0
1.01	2.1	436	130	168	7.3	8.382	69622.23	276.82	212.75	19004.28	18.39	557.87	0	7.03	0.15	21672	436	10.42	3.62
1.01	5	327	130	336	7.55	7.695	62513	315	306	18874	23.25	612	0	7.23	0.1	24435	327	14.44	8.39
1.01	4.9	320	130	504	7.3	8.600	61940	398	330	16286	26.01	842	0	8.84	0.3	19291	320		
1.01	6.1	313	130	672	7.85	9.791	67804	404	305	19727	25.77	688.17	0	9.88	0.2	18319	313		
1.01	247	130	1008	9.1	11.510		73815	438	657	22182	31.7	783	0	12.85		22862	247		

Figura 49: Hoja Excel "Datos" de almacenamiento de los resultados de los ensayos de envejecimiento.

5.2 ENTRADA DE DATOS AL PROGRAMA

Para la entrada de datos se ha aprovechado el libro Excel realizado en el Trabajo Fin de Grado anterior [7].

La entrada de datos se lleva a cabo a través de la hoja “Datos” de un libro Excel (Figura 49), donde se ha realizado una Macro para hacer un filtrado de los datos de interés para el modelo de envejecimiento y los almacena en una nueva hoja de Excel, llamada “Plantilla” (Figura 50). Este filtrado se realiza pulsando el cuadro superior que aparece en la figura 49 (recuadro “Pulse para Exportar los datos a la plantilla”)

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
1													
2													
3													
4													
5													
6													
7													
8	Humedad	O2	DPv	TEMPERATURA	Horas								
9	1,01		1183	130	0								
10	1,01	6.947	842	130	168								
11	1,01	3.598	794	130	336								
12	1,01	8.075	632	130	504								
13	1,01	6.049	610	130	672								
14	1,01	6.644	540	130	840								
15	1,01	2.961	471	130	1008								

Figura 50: Hoja Excel “Plantilla” del almacenamiento de los resultados de los ensayos de envejecimiento.

En esta Macro se realizan unos cálculos previos. Estos cálculos son la inversa del grado de polimerización, la tasa de envejecimiento (k) y el valor de A . La tasa de envejecimiento se obtiene de la siguiente manera:

$$k = \frac{\frac{1}{DP_t} - \frac{1}{DP_{inicial}}}{t}$$

Siendo t , el tiempo de envejecimiento.

El valor de A se calcula como:

$$A = k \cdot e^{\frac{E_a}{RT}}$$

Una vez exportados los datos a la plantilla se puede usar el ejecutable Matlab.

5.3 EJECUTABLE MATLAB

El ejecutable Matlab consta de 10 módulos (.m):

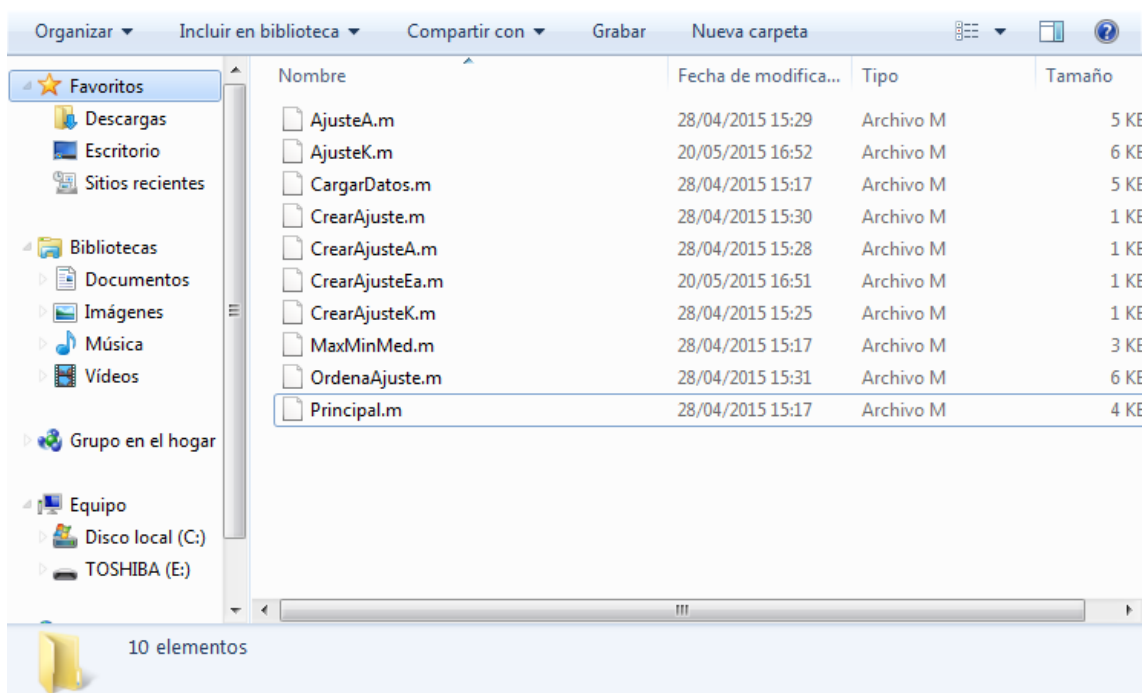


Figura 51: Módulos que componen el ejecutable de Matlab.

5.3.1 Módulo Principal

Al ejecutar el módulo “Principal”, redirecciona primero el programa al módulo “CargarDatos”, donde se cargan los diferentes ensayos y se estructuran.

Descargados los datos, el módulo “Principal” da al usuario cuatro opciones (Figura 52) y redirecciona el programa al módulo correspondiente de cada opción seleccionada.

- La opción 1 muestra los valores máximo, mínimo y la mediana de la tasa de envejecimiento (k) para cada temperatura y para cada humedad.
- La opción 2 representa la evolución de $\left(\frac{1}{DP_t} - \frac{1}{DP_0}\right)$ en el tiempo y ajusta dicha curva a una ecuación de orden cero para cada temperatura y humedad.
- La opción 3 muestra la dependencia del factor A con la humedad.
- La opción 4 muestra la dependencia del $\ln(k)$ con la inversa de la temperatura.

A continuación se le mostraran las diferentes opciones que puede elegir.

Opción 1: Valores máximo, mínimo y la mediana de la tasa de reacción.
para cada temperatura y para cada humedad.

Opción 2: Ajuste de $1/D_{pt}-1/D_{po}$ frente al tiempo.
Obtención de la tasa de reacción.

Opción 3: Ajuste de A frente a la humedad.

Opción 4: Ajuste de $\ln(K)$ frente a $1/T$.
Obtención de la energía de activación.

Figura 52: Opciones del programa.

Para redireccionar el programa según la entrada input (opción introducida), se ha utilizado un bucle “while” anidado con una sentencia “if”. El primero pregunta de forma recursiva la opción que desea realizar, cuando los demás módulos devuelven el control al módulo “Principal”, siempre que haya elementos distintos de cero (en caso de que sea cero, el programa finalizara) y el segundo verifica la entrada input introducida y redirecciona el programa al módulo correspondiente (Figura 53).

```
Q=input('Opción');
global a
while Q>0
    if Q==1
        [Datos]=MaxMinMed(Datos);
    elseif Q==2
        [Datos]=OrdenaAjuste(Datos);
        a=1;
    elseif Q==3
        [Datos]=AjusteA(Datos);
    elseif Q==4
        [Datos]=AjusteK(Datos);
    elseif Q~=1||2||3||4 ;
        disp('El programa sólo tiene 4 opciones.')
        disp('Vuelva a introducir la opción que desee')
    end
    disp('Desea seleccionar otro tipo de opción(introduzca 0 en caso de que no)');
    Q=input('Opción');
end
```

Figura 53: Código Matlab del bucle while y la sentencia if, programado en el módulo Principal.

5.3.2 Módulo CargarDatos

En este módulo se realiza una lectura del fichero Excel donde se encuentran los datos de los ensayos realizados y los estructura. Para poder seleccionar este fichero Excel, se

ha utilizado la función “uigetfile” (Figura 54), la cual devuelve el nombre y la dirección del archivo seleccionado.

```
[Archivo, Direccion] = uigetfile( ...
    {'*.xism','Data Files (*.xism)';
    '*.*', 'All Files (*.*)'}, ...
    'Escoja un archivo para cargar los datos...');
```

Figura 54: Código Matlab referente a la función uigetfile.

Como se puede ver en la figura 54, se le ha dado como primer argumento de entrada, el tipo de documento (*.xism) y de segundo argumento, el encabezado (Escoja un archivo para cargar los datos). Al ejecutarse esta función, aparece una interfaz (Figura 55), donde se muestra el archivo. Seleccionado el archivo, la función devuelve el nombre y el path del archivo.

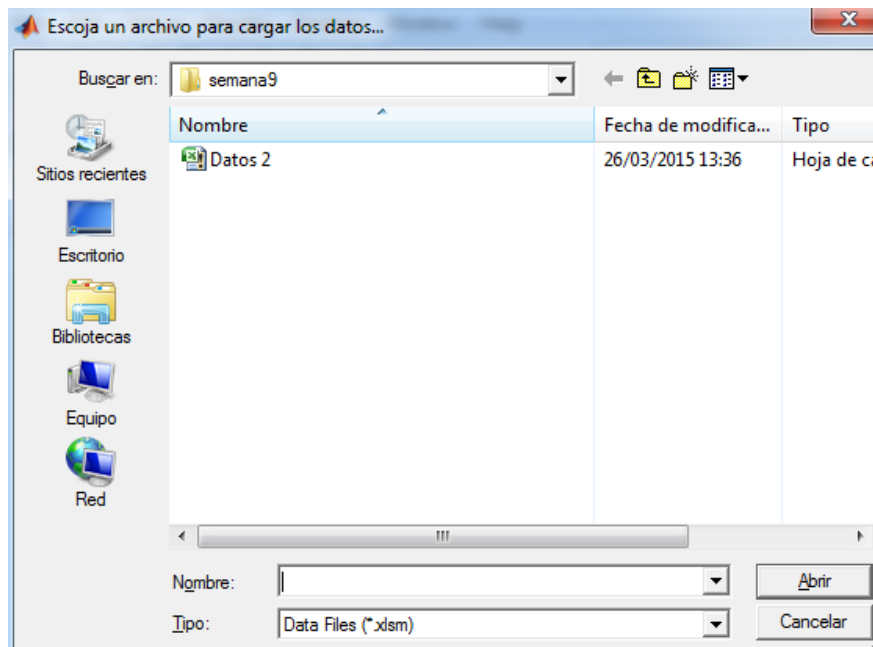


Figura 55: Selección de la hoja Excel de almacenamiento de los resultados de los ensayos de envejecimiento.

La siguiente imagen (Figura 56) muestra el código mediante el cual para el programa en el caso de que le demos a cancelar.

```
if isequal(Archivo,0) || isequal(Direccion,0)
    Datos=Datos ;
    return
end
```

Figura 56: Código Matlab que detiene la ejecución en caso de pulsar cancelar.

A continuación, el programa nos pedirá que introduzcamos el rango que queramos que se lea de la hoja Excel (Figura 57).

```
Introduzca la primera casilla que se debe leer de la hoja excel
entre comillas simples (por ejemplo A8)
Casilla    'A8'
Introduzca la última casilla que se debe leer de la hoja excel
entre comillas simples (por ejemplo M135)
Casilla    'M135'
```

Figura 57: Introducción del rango de la hoja Excel.

Una vez introducido el rango, el programa importa los datos de la Hoja Excel “Plantilla” mediante la función “xlsread” y los almacena en unas variables tipo estructura, llamadas “Ensayos” (Figura 58), donde ordena los datos en función de la Humedad, Oxígeno, Dpv, Temperatura, Horas, etc. Cada ensayo corresponde a una temperatura y humedad determinada.

```
Ensayo =

1x11 struct array with fields:
    Humedad
    Oxigeno
    Dpv
    Temperatura
    Horas
    W
    invDp
    K
    A
```

Figura 58: Estructura “Ensayo”.

Posteriormente estas variables “Ensayo” son almacenadas dentro de la estructura “Datos” (Figura 59) para que resto del programa pueda reconocer las variables “Ensayo”, creando una base de datos interna que será usada después por el resto de módulos, para los cálculos que el programa realiza para obtener los resultados finales.

```
Datos.Ensayo1=Ensayo1;
Datos.Ensayo2=Ensayo2;
Datos.Ensayo3=Ensayo3;
Datos.Ensayo4=Ensayo4;
Datos.Ensayo5=Ensayo5;
Datos.Ensayo6=Ensayo6;
Datos.Ensayo7=Ensayo7;
Datos.Ensayo8=Ensayo8;
Datos.Ensayo9=Ensayo9;
Datos.Ensayo10=Ensayo10;
Datos.Ensayo11=Ensayo11;
```

Figura 59: Estructura “Datos”.

5.3.3 Módulo MaxMinMed

En este módulo, la aplicación pregunta de forma recursiva (Figura 60), mediante el bucle “while”, para qué ensayo desea calcular los valores máximo, mínimo y la mediana de la tasa de envejecimiento. Para finalizar, se introduce el valor 0. De esta manera el bucle “while” deja de ejecutar las sentencias, dando el control del programa al módulo “Principal”.

```
Usted ha seleccionado valores máx, mín y la mediana de la
tasa de reacción.
A continuación se le mostraran los diferentes tipos de ensayos
Ensayo 1: Temperatura:130°C y Humedad:1,01

Ensayo 2: Temperatura:130°C y Humedad:2,92

Ensayo 3: Temperatura:130°C y Humedad:1,94

Ensayo 4: Temperatura:110°C y Humedad:0,11

Ensayo 5: Temperatura:110°C y Humedad:1,01

Ensayo 6: Temperatura:110°C y Humedad:1,94

Ensayo 7: Temperatura:110°C y Humedad:2,92

Ensayo 8: Temperatura:120°C y Humedad:0,89

Ensayo 9: Temperatura:120°C y Humedad:1,03

Ensayo 10: Temperatura:120°C y Humedad:2,47

Ensayo 11: Temperatura:120°C y Humedad:4,28

Seleccione el número del ensayo. (Para finalizar introduzca 0)
Ensayo|
```

Figura 60: Introducción del tipo de ensayo para el que se desea obtener los valores máximo, mínimo y mediana de la tasa de envejecimiento (k).

Los valores máximos, mínimos y la mediana se calculan mediante las funciones de la librería de Matlab (max(), min() y median()), las cuales devuelven el valor máximo, mínimo y la mediana de un conjunto de valores. Para el caso de la mediana se ha utilizado la función “nanmedian” para que ignore los valores NaN (not a number) y evitar que se produzcan errores en el cálculo (Figura 61).


```

while P>0
Maximo=max(Ensayo(P).K);
Minimo=min(Ensayo(P).K);
Mediana=nanmedian(Ensayo(P).K);%nanmedian(ignora los valores Nan)
disp(['Máximo ',num2str(Maximo)]);
disp(['Mínimo ',num2str(Minimo)]);
disp(['Mediana ',num2str(Mediana)]);
disp(' ')
disp('Seleccione el número del ensayo.(Para finalizar introduzca 0)');
P=input('Ensayo');
end

```

Figura 61: Código Matlab referente al cálculo de los valores máximo, mínimo y la mediana de la tasa de envejecimiento para cada ensayo.

5.3.4 Módulo OrdenaAjuste

En el módulo “OrdenaAjuste” se ajusta la curva $(\frac{1}{DP_t} - \frac{1}{DP_0})$ frente al tiempo, obteniendo los valores de k y de A. Este módulo pide que se indique para qué ensayo se quieren ajustar las curvas (Figura 62).

```

Opción2
Usted ha seleccionado Ajuste de 1/Dpt-1/Dpo frente al tiempo
A continuación se le mostraran los diferentes tipos de ensayos
Ensayo 1: Temperatura:130°C y Humedad:1,01

Ensayo 2: Temperatura:130°C y Humedad:2,92

Ensayo 3: Temperatura:130°C y Humedad:1,94

Ensayo 4: Temperatura:110°C y Humedad:0,11

Ensayo 5: Temperatura:110°C y Humedad:1,01

Ensayo 6: Temperatura:110°C y Humedad:1,94

Ensayo 7: Temperatura:110°C y Humedad:2,92

Ensayo 8: Temperatura:120°C y Humedad:0,89

Ensayo 9: Temperatura:120°C y Humedad:1,03

Ensayo 10: Temperatura:120°C y Humedad:2,47

Ensayo 11: Temperatura:120°C y Humedad:4,28

Seleccione el número del ensayo.(Para finalizar introduzca 0)
Ensayo|

```

Figura 62: Introducción del tipo de ensayo para el que se desea hacer el ajuste.

Después de indicar el ensayo, se carga la variable “str” a “si”, para que pueda realizar el ajuste inicial (con todos los puntos) y a continuación tenemos dos bucles anidados “while” (Figura 63):

- El primero es la condición de preguntar recursivamente el ensayo para el que se desea hacer el ajuste. Para finalizar este bucle se introduce el valor cero y se devuelve el control del programa al módulo “Principal”. Además se crean dos vectores, x e y, con los valores del tiempo y los valores de $(\frac{1}{DP_t} - \frac{1}{DP_0})$ correspondientes a cada ensayo, que después serán usados como variables de entrada en el módulo “CrearAjuste” que se explicara posteriormente.
- El segundo realiza la representación y el ajuste de los ensayos. Para ello comprueba que la variable “str” tenga el valor “si” e introduce una nueva sentencia anidada “if”, que verifica la entrada input (“Ensayo”) y redirecciona el programa al módulo “CrearAjuste” para el ensayo seleccionado.

```
str='si';

while P>0

    x=Ensayo(P).Horas;
    y=Ensayo(P).invDp;

    while (strcmp(str,'si')|| strcmp(str,'Si')|| strcmp(str,'SI')|| ...
           strcmp(str,'s')|| strcmp(str,'sí')|| strcmp(str,'Sí')|| strcmp(str,'SÍ'))
        if P==1
            [fitresult, gof] = CrearAjuste('Temperatura:130°C y Humedad:1,01',x, y);
        elseif P==2
            [fitresult, gof] = CrearAjuste('Temperatura:130°C y Humedad:2,92',x, y);
        elseif P==3
            [fitresult, gof] = CrearAjuste('Temperatura:130°C y Humedad:1,94',x, y);
        elseif P==4
            [fitresult, gof] = CrearAjuste('Temperatura:110°C y Humedad:0,11',x, y);
        elseif P==5
            [fitresult, gof] = CrearAjuste('Temperatura:110°C y Humedad:1,01',x, y);
        elseif P==6
            [fitresult, gof] = CrearAjuste('Temperatura:110°C y Humedad:1,94',x, y);
        elseif P==7
            [fitresult, gof] = CrearAjuste('Temperatura:110°C y Humedad:2,92',x, y);
        elseif P==8
            [fitresult, gof] = CrearAjuste('Temperatura:120°C y Humedad:0,89',x, y);
        elseif P==9
            [fitresult, gof] = CrearAjuste('Temperatura:120°C y Humedad:1,03',x, y);
        elseif P==10
            [fitresult, gof] = CrearAjuste('Temperatura:120°C y Humedad:2,47',x, y);
        elseif P==11
            [fitresult, gof] = CrearAjuste('Temperatura:120°C y Humedad:4,28',x, y);
        end
    end
end
```

Figura 63: Código Matlab referente a los dos bucles while y la sentencia if.

Se han introducido como variables de entrada al módulo “CrearAjuste” los vectores x e y indicados anteriormente y el módulo “CrearAjuste” devuelve las variables “fitresult” y “gof”. Estas variables son de tipo estructura con diferentes campos como se puede ver en la figura 64, que serán utilizados después (Figuras 65 y 67).

```

fitresult =

Linear model Poly1:
fitresult(x) = p1*x + p2
Coefficients (with 95% confidence bounds):
p1 = 0.00126 (0.001146, 0.001373)
p2 = 0 (fixed at bound)

gof =

sse: 0.0331
rsquare: 0.9705
dfe: 6
adjrsquare: 0.9705
rmse: 0.0742

```

Figura 64: Estructura fitresult y gof.

Los resultados de los ajustes se guardan en la estructura “Datos” del programa para que puedan ser usados posteriormente (Figura 65).

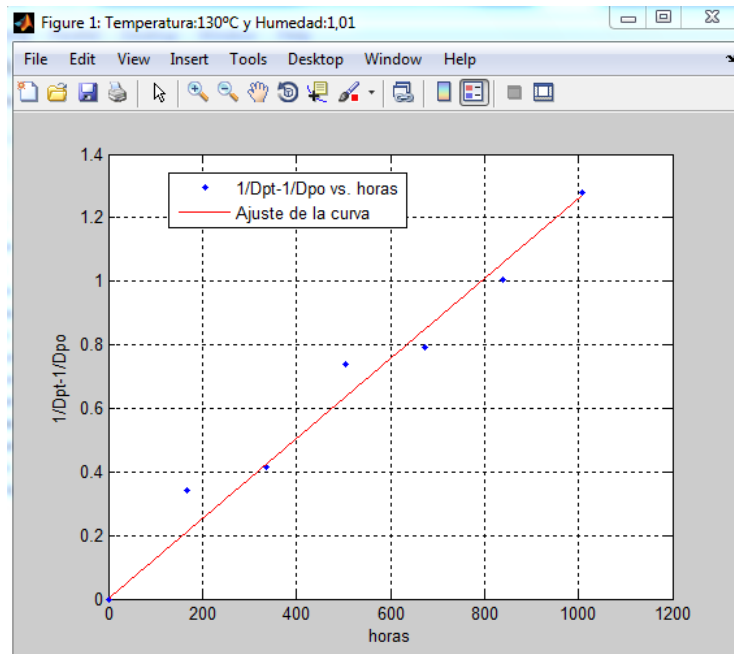
```

%Almacenamiento de los resultados
Datos.Ajuste(P).Temperatura=Ensayo(P).Temperatura(1);
Datos.Ajuste(P).Humedad=Ensayo(P).Humedad(1);
Datos.Ajuste(P).k=fitresult.p1/1000;
Datos.Ajuste(P).R2=num2str(gof.rsquare);
Datos.Ajuste(P).A=fitresult.p1/1000*exp(111000/8.314/(Ensayo(P).Temperatura(1)+273));

```

Figura 65: Código Matlab correspondiente al almacenamiento de los resultados de los ajustes en la estructura datos.

Una vez introducido el número del ensayo, aparece una pantalla emergente donde se puede ver la evolución de $\left(\frac{1}{DP_t} - \frac{1}{DP_0}\right)$ frente al tiempo en horas (Figura 66).

Figura 66: Ajuste de la curva de la evolución de $\left(\frac{1}{DP_t} - \frac{1}{DP_0}\right)$ frente al tiempo en horas para una temperatura de 130°C y una humedad de 1,01%.

Esta evolución corresponde a un ajuste de la ecuación:

$$\frac{1}{DP_t} - \frac{1}{DP_0} = kt$$

El programa también muestra la ecuación que describe la evolución, los coeficientes de la misma, los parámetros que indican la bondad del ajuste: La suma de los cuadrados de los errores(SSE), el coeficiente de determinación(R-cuadrado) y el error cuadrático medio(RMSE); y los valores de k y de A calculados a partir del ajuste (Figura 67).

La ecuación, los coeficientes de la misma y los parámetros que indican la bondad del ajuste han sido devueltos por el módulo “CrearAjuste” que se expondrá posteriormente.

```
Ensayo1
Linear model Poly1:
fitresult(x) = p1*x + p2
Coefficients (with 95% confidence bounds):
  p1 =      0.00126  (0.001146, 0.001373)
  p2 =           0  (fixed at bound)

Goodness of fit:
SSE: 0.033054   R-square: 0.97055   RMSE: 0.074222

Temperatura: 130
Humedad: 1.0100
  k: 1.2595e-06
  R2: '0.97055'
  A: 3.0757e+08
```

Figura 67: Ecuación que describe la evolución, los coeficientes (p1 y p2) de la misma, los parámetros que indican la bondad del ajuste: La suma de los cuadrados de los errores(SSE), el coeficiente de determinación(R-cuadrado) y el error cuadrático medio(RMSE); y los valores de k y de A calculados a partir del ajuste.

Además, la aplicación permite eliminar los puntos que se desee del ensayo seleccionado (Figura 66). Esta acción se realiza cuando el valor de R-cuadrado definido en la variable “Rsqr2” es menor de 0,9, ya que para valores menores de 0,9, se considera que el ajuste no es muy bueno. Para ello se utiliza una sentencia “if” anidada junto a una nueva sentencia “if” en el que el primero se verifica el valor de “Rsqr2” y en el segundo, la igualdad de una variable tipo string (str), en este caso “sí”, introducida por el usuario, que también será verificada por el segundo bucle “while” (Figura 63) para volver a hacer el ajuste con los puntos eliminados.

Comprobadas las dos variables, el programa pide al usuario el punto a eliminar (Figura 69).En el caso de que se deseen eliminar más puntos, estos se pondrán entre corchetes dejando un espacio entre los puntos.

En el caso de que “Rsqr2” sea mayor de 0,9, mediante la función “break” se interrumpe el segundo bucle “while”, volviendo a la condición del primer bucle “while”.

Secuencia de código Matlab referente a lo explicado anteriormente:

```
if Rsq2<0.9
    disp('El ajuste no es muy bueno');
    str=input('¿Desea hacer un nuevo ajuste eliminando algunos puntos?(Si/No) ', 's');

    if (strcmp(str,'si')|| strcmp(str,'Si')|| strcmp(str,'SI')|| strcmp(str,'s')...
        || strcmp(str,'sí')|| strcmp(str,'Si')|| strcmp(str,'SÍ'))
        punto=input('Punto del ensayo a eliminar.(Para finalizar introduzca 0)');
        if punto>0
            x(punto)=[];
            y(punto)=[];
        elseif punto==0;
            break
        end
    end
end
if Rsq2>0.9
    break
end
```

Figura 68: Código Matlab correspondiente a la opción que permite eliminar puntos del ensayo seleccionado.

```
Ensayo4
Linear model Poly1:
fitresult(x) = p1*x + p2
Coefficients (with 95% confidence bounds):
p1 = 0.0005285 (0.0004693, 0.0005877)
p2 = 0 (fixed at bound)

Goodness of fit:
SSE: 0.1627 R-square: 0.85398 RMSE: 0.11644

Temperatura: 110
Humedad: 0.1100
k: 5.2850e-07
R2: '0.85398'
A: 7.2794e+08

El ajuste no es muy bueno
¿Desea hacer un nuevo ajuste eliminando algunos puntos?(Si/No) si
Punto del ensayo a eliminar.(Para finalizar introduzca 0)
```

Figura 69: Introducción del punto a eliminar.

Después de seleccionar los puntos a eliminar, aparece una nueva ventana emergente donde se puede ver la evolución de $\left(\frac{1}{DP_t} - \frac{1}{DP_0}\right)$ frente al tiempo en horas y los parámetros anteriormente nombrados en la figura 67, calculados a partir del nuevo ajuste.

5.3.4.1 Módulo CrearAjuste

Los ajustes de las curvas se llevan a cabo mediante la herramienta “Curve FittingToolbox (cftool)” de Matlab. Estos ajustes se realizan en los módulos:

“CrearAjuste”, “CrearAjusteA”, “CrearAjusteK” y “CrearAjusteEa”, creados a partir del módulo “createFit” generado por Matlab.

Al abrir la herramienta “cftool” aparece una ventana emergente donde se cargaran los datos que queremos analizar (Figura 70).

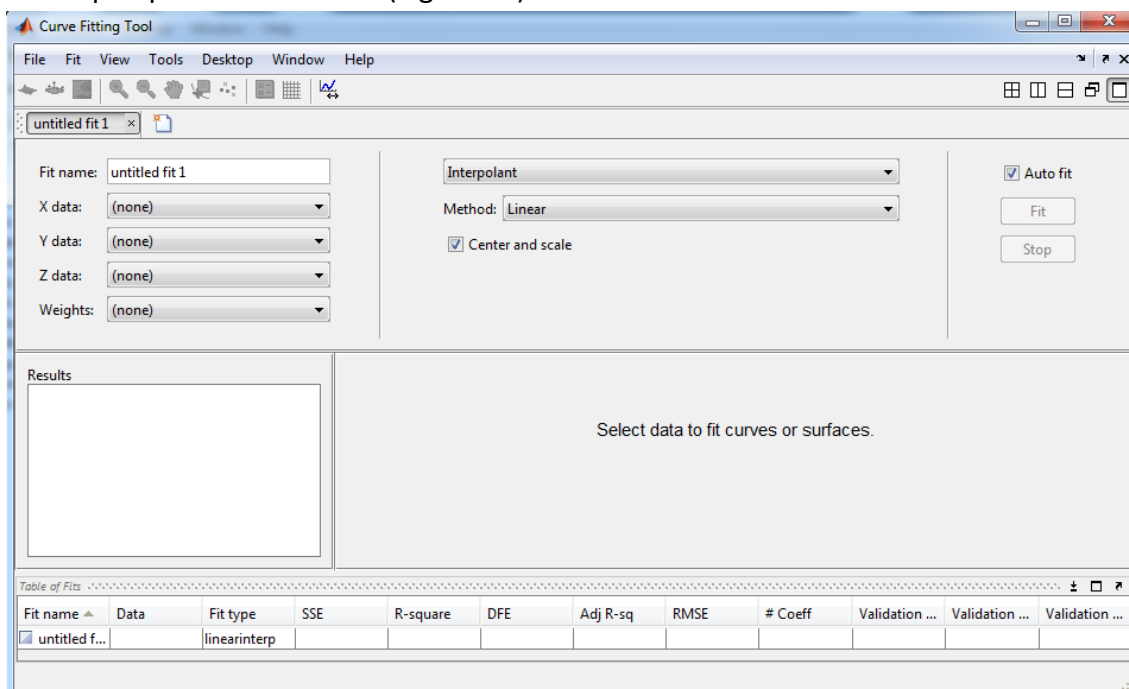


Figura 70: Ventana inicial de la herramienta cftool.

Creado el ajuste, en el menú “File” generaremos el código de Matlab “createFit” de este proceso (Figura 71) y se realizaran unos cambios en el código generado (Figura 72) que a continuación se explicaran.

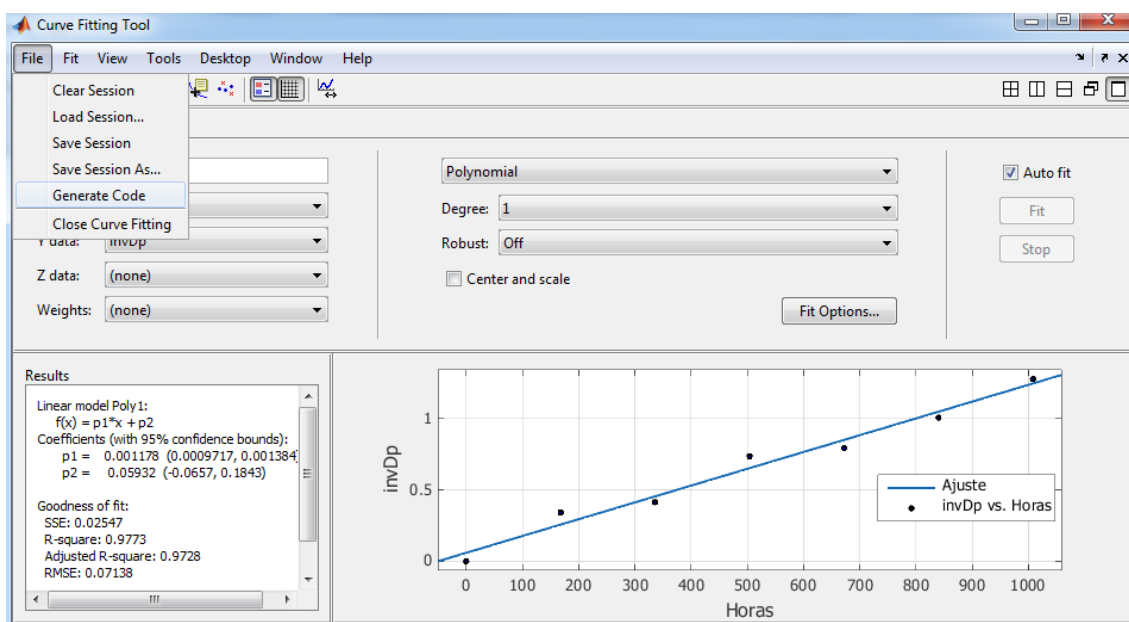


Figura 71: Secuencia indicando la ruta para generar el código de Matlab correspondiente al ajuste.

En el apartado “set up fitype and options” se ha ajustado a una función polinómica de grado uno ('poly1') y se ha forzado que todas las rectas pasen por el origen de coordenadas modificando “opst.Lower” y “opst.Upper”.

En el apartado “plot fit with data” se le ha dado un título a cada figura, modificándose para cada ensayo. También, se ha modificado la leyenda del gráfico con los siguientes letreros, “1/Dpt-1Dpo vs horas” y “Ajuste de la curva”; y por último, se le ha dado un título al eje x (horas) y el eje y ($\frac{1}{D_{pt}} - \frac{1}{D_{p0}}$).

Se han declarado como variables de entrada x e y, definidas en el apartado anterior, con los valores del tiempo en horas y los valores de $(\frac{1}{D_{pt}} - \frac{1}{D_{p0}})$ correspondientes a cada ensayo.

El código modificado es el siguiente:

```
[xData, yData] = prepareCurveData( x, y);

% Set up fitype and options.
ft = fitype( 'poly1' );
opts = fitoptions( ft );
opts.Lower = [-Inf 0];
opts.Upper = [Inf 0];

% Fit model to data.
[fitresult, gof] = fit( xData, yData, ft, opts );

% Plot fit with data.
figure( 'Name', titulo );
h = plot( fitresult, xData, yData );
legend( h, '1/Dpt-1/Dpo vs. horas ', 'Ajuste de la curva', 'Location', 'NorthEast' );
% Label axes
xlabel( 'horas' );
ylabel( '1/Dpt-1/Dpo' );
grid on
```

Figura 72: Código Matlab correspondiente al módulo CrearAjuste.

5.3.5 Módulo AjusteA

Este módulo muestra la dependencia del valor A con la humedad.

Antes de que el programa pida al usuario que indique para qué temperatura quiere ver dicha evolución, el programa tiene que verificar dos condiciones:

- Primero, al devolver el módulo “OrdenaAjuste” el control al módulo “Principal” se carga una variable global “a” con valor 1. Esta variable “a” se ha definido como global para que pueda ser usada por los demás módulos en los que se requiera su uso. Se comprueba que esta variable tiene el valor de 1 mediante la sentencia “if”. Esta condición comprueba que el usuario ha accedido primero a la opción dos, donde se calculan los valores de A, antes de acceder a la opción

tres, donde se representa A frente a la humedad a partir de los valores calculados. En caso de que el usuario quiera acceder antes a la opción tres, sin haber pasado por la opción dos, el programa se lo indicara (Figura 73).

```
else
    disp('Usted no puede acceder a la opción 3.')
    disp('Para acceder a la opción 3 necesita primero entrar en la opción 2, debido a que en la opción 2')
    disp('se calculan los valores de K y los valores de A necesarios para representar A frente a la humedad.')
end
```

Figura 73: Indicativo del programa cuando el usuario entra en la opción tres sin haber accedido a la opción dos.

- Segundo, el programa comprueba que se hayan calculado todos los valores de A para cada ensayo mediante la sentencia “try... catch... end”, que permite gestionar los errores producidos durante la ejecución del programa. En este caso, soluciona el error de no haber calculado todos los valores de A, pasando el control de la ejecución al bloque “catch”, donde se recuerda al usuario que no ha calculado dichos valores de A (Figura 74). Si no se produce error, el bloque try continua la ejecución, permitiendo la representación.

```
catch
    disp('Usted no puede acceder a la opción 3.')
    disp('Para acceder a la opción 3 necesita primero tener ajustados todos los ensayos en la opción 2,')
    disp('para poder representar A frente a la humedad.')
end
```

Figura 74: Indicativo del programa al usuario, mostrándole que no ha calculado todos los valores de A.

Cumplidas estas dos condiciones, se crean una serie de vectores con los valores de A y de humedad para cada temperatura (Figura 75) que serán usados después como variables x e y en el módulo “CrearAjusteA”.

```
%Vector A:
A_T130=[A1,A2,A3];
A_T110=[A4,A5,A6,A7];
A_T120=[A8,A9,A10,A11];

%Vector Humedad:
H_130=[Datos.Ajuste(1).Humedad,Datos.Ajuste(2).Humedad,Datos.Ajuste(3).Humedad];
H_110=[Datos.Ajuste(4).Humedad,Datos.Ajuste(5).Humedad,Datos.Ajuste(6).Humedad,Datos.Ajuste(7).Humedad];
H_120=[Datos.Ajuste(8).Humedad,Datos.Ajuste(9).Humedad,Datos.Ajuste(10).Humedad,Datos.Ajuste(11).Humedad];
```

Figura 75: Vectores de A y de humedad para cada temperatura.

A continuación, el programa pide al usuario de forma recursiva para qué temperatura quiere mostrar dicha evolución (Figura 76), mediante el bucle “while” y verifica la entrada input (“Temperatura”) mediante la sentencia “if”, redireccionando el programa al módulo “CrearAjusteA” para la temperatura seleccionada (Figura 77).

Opción3

Usted ha seleccionado Ajuste de A frente a la humedad

Seleccione la temperatura del ensayo: 130°C , 110°C y 120°C

Temperatura

Figura 76: Introducción de la temperatura.

```
while T>0;
    if T==130
        x=H_130;
        y=A_T130;
        [fitresult, gof] = CrearAjusteA('Dependencia de A con la humedad. Temperatura:130°C ',x, y);
        disp(fitresult)
        disp(' ')
        disp('Goodness of fit:')
        Cartel=['SSE: ',num2str(gof.sse),' R-square: ',num2str(gof.rsquare),' RMSE: ',num2str(gof.rmse);];
        disp(Cartel)
    elseif T==110
        x=H_110;
        y=A_T110;
        [fitresult, gof] = CrearAjusteA('Dependencia de A con la humedad. Temperatura:110°C',x, y);
        disp(fitresult)
        disp(' ')
        disp('Goodness of fit:')
        Cartel=['SSE: ',num2str(gof.sse),' R-square: ',num2str(gof.rsquare),' RMSE: ',num2str(gof.rmse);];
        disp(Cartel)
    elseif T==120
        x=H_120;
        y=A_T120;
        [fitresult, gof] = CrearAjusteA('Dependencia de A con la humedad. Temperatura:120°C',x, y);
        disp(fitresult)
        disp(' ')
        disp('Goodness of fit:')
        Cartel=['SSE: ',num2str(gof.sse),' R-square: ',num2str(gof.rsquare),' RMSE: ',num2str(gof.rmse);];
        disp(Cartel)
    end
end
```

Figura 77: Código Matlab correspondiente al bucle while y la sentencia if del módulo AjusteA.

Introducida la temperatura se muestra la evolución de A frente a la humedad (Figura 78):

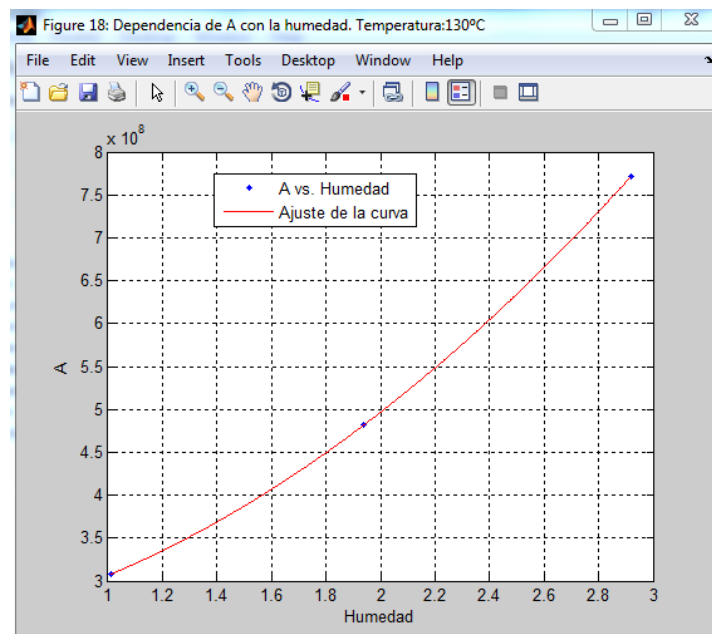


Figura 78: Dependencia de A con la humedad para una temperatura de 130°C.

El programa proporciona los coeficientes de la ecuación y su intervalo de confianza y los indicadores de bondad del ajuste (Figura 79).

```
Temperatura130
Linear model Poly2:
fitresult(x) = p1*x^2 + p2*x + p3
Coefficients:
    p1 = 5.681e+07
    p2 = 1.97e+07
    p3 = 2.297e+08

Goodness of fit:
SSE: 7.1054e-14   R-square: 1   RMSE: NaN
```

Figura 79: Indicadores del ajuste de la evolución de A con la humedad.

5.3.5.1 Módulo CrearAjusteA

En ese módulo se realiza el ajuste y la representación de los valores de A frente a la humedad. Para ello se genera el código Matlab (Figura 80) mediante la herramienta “cftool” de la misma manera que en el módulo “CrearAjuste” y se realizan los siguientes cambios:

- Se han declarado como variables de entrada x e y, definidas en el apartado anterior, con los valores de A y de humedad para cada temperatura.
- En el apartado “set up fitype and options” se ha ajustado a una función polinómica de grado dos (‘poly2’) y se ha acotado a 0 el límite inferior modificando “opst.Lower”.
- En el apartado “plot fit with data” se le ha dado un título a cada figura, modificándose para cada ensayo. También, se ha modificado la leyenda del gráfico con los siguientes letreros, “A vs Humedad” y “Ajuste de la curva “; y por último, se le ha dado un título al eje x (Humedad) y el eje y (A).

```

[xData, yData] = prepareCurveData( x, y);

% Set up fittype and options.
ft = fittype( 'poly2' );
opts = fitoptions( ft );
opts.Lower = [0 0 0];
opts.Upper = [Inf Inf Inf];

% Fit model to data.
[fitresult, gof] = fit( xData, yData, ft, opts );

% Plot fit with data.
figure( 'Name', titulo );
h = plot( fitresult, xData, yData );
legend( h, 'A vs. Humedad ', 'Ajuste de la curva', 'Location', 'NorthEast' );
% Label axes
xlabel( 'Humedad' );
ylabel( 'A' );
grid on

```

Figura 80: Código Matlab correspondiente al módulo CrearAjusteA.

5.3.6 Módulo AjusteK

En este módulo, la aplicación muestra la evolución de $\ln(k)$ frente a $1/T$, calculando la energía de activación. También muestra la evolución de los valores de E_a obtenidos con la humedad.

Como en el módulo “AjusteA”, antes de que el programa pida al usuario para qué temperatura desea mostrar la evolución, el programa tiene que comprobar que se cumplen dos condiciones:

- Verificar que el valor de la variable global “a” es igual a 1, mediante la sentencia “if”. Esta condición comprueba que el usuario ha accedido primero a la opción dos, donde se calculan los valores de k necesarios para la representación que se realiza en la opción cuatro. En caso de que el usuario quiera acceder antes a la opción cuatro, sin haber pasado por la opción dos, el programa se lo indicara (Figura 81).

```

Usted no puede acceder a la opción 4.
Para acceder a la opción 4 necesita primero entrar en la opción 2, debido a que en la opción 2
se calculan los valores de K necesarios para representar ln(k) frente a 1/T.
Desea seleccionar otro tipo de opción(introduzca 0 en caso de que no)

```

Figura 81: Indicativo del programa cuando el usuario entra en la opción cuatro sin haber accedido a la opción dos.

- Comprobar que se hayan calculado todos los valores de k para cada ensayo de envejecimiento mediante la sentencia “try...catch...end”, que permite

gestionar, el error producido de no haber calculado todos los valores de k , durante la ejecución de la aplicación, mediante el bloque “catch”, donde se recuerda al usuario que no ha calculado dichos valores de k (Figura 82). En caso de tener calculados todos los valores de K , el bloque try continua la ejecución permitiendo la representación.

```
catch
    disp('Usted no puede acceder a la opción 4.')
    disp('Para acceder a la opción 4 necesita primero tener ajustados todos los ensayos en la opción 2,')
    disp('para poder representar ln(k) frente a 1/T.')
end
```

Figura 82: Indicativo del programa al usuario, mostrándole que no ha calculado todos los valores de k .

Cumplidas estas dos condiciones, se crean una serie de variables donde se calcula el logaritmo neperiano de k , mediante la función “log” y la inversa de la temperatura, por medio de la función “inv” (Figura 83).

```
%Ln (K) :
K_ln1=log( Datos.Ajuste(1).k ); %Humedad=1,01
K_ln5=log( Datos.Ajuste(5).k );
K_ln9=log( Datos.Ajuste(9).k );
K_ln3=log( Datos.Ajuste(3).k ); %Humedad=1,94
K_ln6=log( Datos.Ajuste(6).k );
K_ln2=log( Datos.Ajuste(2).k ); %Humedad=2.92
K_ln7=log( Datos.Ajuste(7).k );

%1/T:
InversaT130=inv(Ensayo(1).Temperatura(1)+273);
InversaT110=inv(Ensayo(4).Temperatura(1)+273);
InversaT120=inv(Ensayo(8).Temperatura(1)+273);
```

Figura 83: Variables donde se calcula el $\ln(k)$ y la inversa de la temperatura.

Después, estas variables son introducidas en unos vectores definidos para cada humedad, que serán utilizados como variables x e y en el módulo “CrearAjuste” (Figura 84).

```

%Vector ln(K) para cada humedad:
K_ln_101=[K_ln1,K_ln5,K_ln9];
K_ln_194=[K_ln3,K_ln6];
K_ln_292=[K_ln2,K_ln7];

%Vector inversa de la temperatura para cada humedad:
InversaT_101=[InversaT130,InversaT110,InversaT120];
InversaT_194=[InversaT130,InversaT110];
InversaT_292=[InversaT130,InversaT110];

```

Figura 84: Vectores $\ln(k)$ y $(1/T)$ para cada humedad.

A continuación, el programa pide al usuario de forma recursiva para qué humedad quiere mostrar la evolución del $\ln(k)$ frente a $1/T$ (Figura 85), mediante el bucle “while” y verifica la entrada input (“Humedad”) mediante la sentencia “if”, redireccionando el programa al módulo “CrearAjusteA” para la temperatura seleccionada (Figura 86). Además, se carga la variable “n” a 0. Esta variable “n” se irá incrementando al ir introduciendo las diferentes humedades para formar los vectores de humedad y de la energía de activación (Figura 87), que serán usados posteriormente como variables de entrada (x e y) en el módulo “CrearAjusteEa”.

```

Opción    4
Usted ha seleccionado Ajuste de ln(K) frente a 1/T
Seleccione la humedad a la que desea hacer el ajuste: 1.01 % , 1.94 % y 2.92 %
Humedad

```

Figura 85: Introducción de la humedad.

```

n=0;
while H>0;
    n=n+1;
    if H==1.01
        x=InversaT_101;
        y=K_ln_101;
        [fitresult, gof] = CrearAjusteK('Dependencia de ln(k) con la 1/T. Humedad:1.01 ',x, y);
        disp(fitresult)
        disp(' ')
        disp('Goodness of fit:')
        Cartel=['SSE: ',num2str(gof.sse),' R-square: ',num2str(gof.rsquare),' RMSE: ',num2str(gof.rmse)];
        disp(Cartel)
        disp(' ')
        disp('Energía de activación:')
        Ea=['Ea= ',num2str(-fitresult.p1*8.31434/1000),' KJ/mol'];
        disp(Ea)
    elseif H==1.94
        x=InversaT_194;
        y=K_ln_194;
        [fitresult, gof] = CrearAjusteK('Dependencia de ln(k) con la 1/T. Humedad:1.94',x, y);
        disp(fitresult)
        disp(' ')
        disp('Goodness of fit:')
        Cartel=['SSE: ',num2str(gof.sse),' R-square: ',num2str(gof.rsquare),' RMSE: ',num2str(gof.rmse)];
        disp(Cartel)
        disp(' ')
        disp('Energía de activación:')
        Ea=['Ea= ',num2str(-fitresult.p1*8.31434/1000),' KJ/mol'];
        disp(Ea)
    end
end

```

Figura 86: Código Matlab correspondiente al bucle while y la sentencia if del módulo AjusteK.

```

%Vectores de energía de activación y humedad:
EnergActiv(n)=-fitresult.p1*8.31434/1000;
Humedad(n)=H;

```

Figura 87: Vectores de la energía de activación y humedad.

Seleccionada la humedad, se muestra la evolución del $\ln(K)$ frente a $1/T$ (Figura 88):

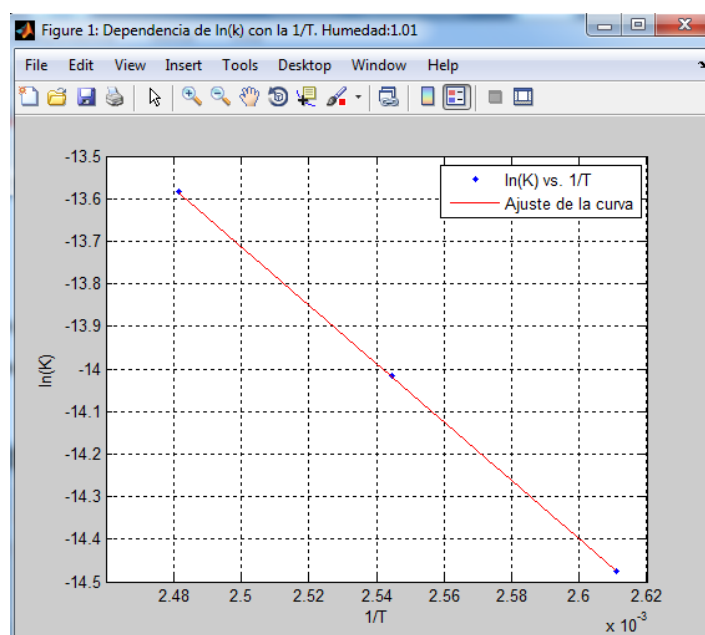


Figura 88: Evolución del $\ln(k)$ frente a $1/T$ para una humedad de 1,01%.

La aplicación proporciona los coeficientes de la ecuación, los indicadores de bondad del ajuste y el valor de la energía de activación obtenida a partir del ajuste (Figura 89).

```

Humedad1.01
  Linear model Poly1:
  fitresult(x) = p1*x + p2
  Coefficients (with 95% confidence bounds):
    p1 =      -6863  (-6942, -6784)
    p2 =       3.444  (3.243, 3.645)

  Goodness of fit:
  SSE: 3.2471e-07  R-square: 1  RMSE: 0.00056984

  Energía de activación:
  Ea= 57.0573  KJ/mol
  
```

Figura 89: Coeficientes de la ecuación, los indicadores de bondad del ajuste y el valor de la energía de activación obtenida a partir del ajuste.

Obtenidos los diferentes valores de la energía de activación, el programa verifica mediante la sentencia "if" (Figura 90) que el valor de la variable "n" es mayor de 1, es decir, que se hayan calculado más de un valor de E_a para poder llevar a cabo la evolución, redireccionando el programa al módulo "CrearAjusteEa" donde se realiza el ajuste y la representación de la energía de activación con la humedad (Figura 91).

```

if n>1
    x=Humedad;
    y=EnergActiv;
    [fitresult, gof] = CrearAjusteEa('Dependencia de la Energía de Activación con la Humedad ',x, y);
    disp(fitresult)
    disp(' ')
    disp('Goodness of fit:')
    Cartel=['SSE: ',num2str(gof.sse),'   R-square: ',num2str(gof.rsquare),'   RMSE: ',num2str(gof.rmse)];
    disp(Cartel)
end

```

Figura 90: Código Matlab correspondiente a la sentencia "if" y al redireccionamiento al modulo "CrearAjusteEa".

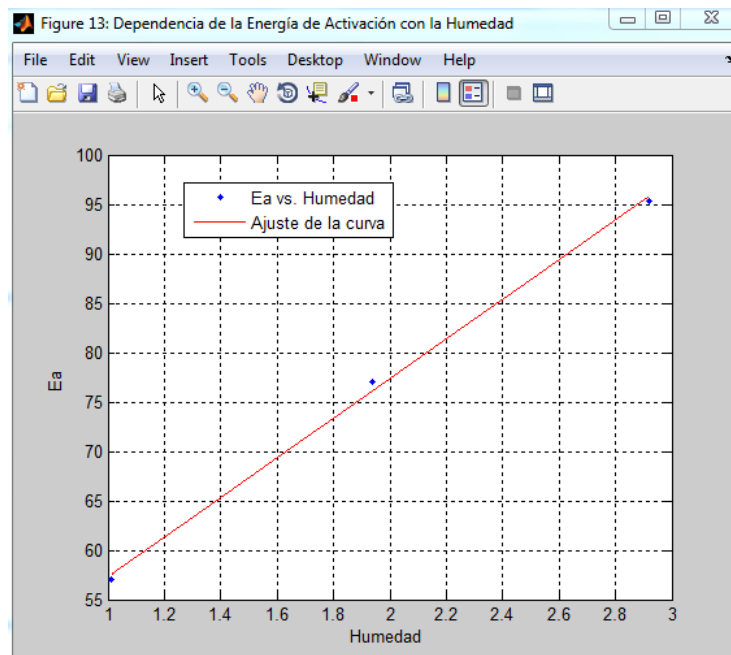


Figura 91: Evolución de Ea frente a la humedad.

La aplicación proporciona los coeficientes de la ecuación y los indicadores de bondad del ajuste (Figura 92).

```

Linear model Poly1:
fitresult(x) = p1*x + p2
Coefficients (with 95% confidence bounds):
    p1 =      20.06   (10.3, 29.82)
    p2 =      37.23   (16.68, 57.78)

Goodness of fit:
SSE: 1.0756   R-square: 0.99854   RMSE: 1.0371

```

Figura 92: Coeficientes de la ecuación y los indicadores de bondad del ajuste.

5.3.6.1 Módulo CrearAjusteK

En ese módulo se realiza el ajuste y la representación de la evolución del $\ln(k)$ frente a $1/T$. Para ello se genera el código Matlab (Figura 93) mediante la herramienta “cftool” de la misma manera que en el módulo “CrearAjuste” y se realizan los siguientes cambios:

- Se han declarado como variables de entrada x e y , definidas en el apartado anterior, con los valores de $\ln(k)$ y la inversa de la temperatura para cada humedad.
- En el apartado “set up fittype and options” se ha ajustado a una función polinómica de grado uno (‘poly1’).
- En el apartado “plot fit with data” se le ha dado un título a cada figura, modificándose para cada ensayo. También, se ha modificado la leyenda del gráfico con los siguientes letreros, “ $\ln(k)$ vs $1/T$ ” y “Ajuste de la curva”; y por último, se le ha dado un título al eje x ($1/T$) y el eje y ($\ln(k)$).

```
[xData, yData] = prepareCurveData( x, y);

% Set up fittype and options.
ft = fittype( 'poly1' );
opts = fitoptions( ft );
opts.Lower = [-Inf -Inf];
opts.Upper = [Inf Inf];

% Fit model to data.
[fitresult, gof] = fit( xData, yData, ft, opts );

% Plot fit with data.
figure( 'Name', titulo );
h = plot( fitresult, xData, yData );
legend( h, 'ln(K) vs. 1/T ', 'Ajuste de la curva', 'Location', 'NorthEast' );
% Label axes
xlabel( '1/T' );
ylabel( 'ln(K)' );
grid on
```

Figura 93: Código Matlab correspondiente al módulo CrearAjusteK.

5.3.6.2 Módulo CrearAjusteEa

En ese módulo se realiza el ajuste y la representación de la evolución de la energía de activación frente a la humedad. Para ello se genera el código Matlab (Figura 94) mediante la herramienta “cftool” de la misma manera que en el módulo “CrearAjuste” y se realizan los siguientes cambios:

- Se han declarado como variables de entrada x e y , definidas en el apartado anterior, con los valores de la energía de activación y la humedad.

- En el apartado “set up fitttype and options” se ha ajustado a una función polinómica de grado uno (‘poly1’).
- En el apartado “plot fit with data” se le ha dado un título a la figura. También, se ha modificado la leyenda del gráfico con los siguientes letreros, “Ea vs Humedad” y “Ajuste de la curva “; y por último, se le ha dado un título al eje x (Humedad) y el eje y (Ea).

```
[xData, yData] = prepareCurveData( x, y);

% Set up fitttype and options.
ft = fitttype( 'poly1' );
opts = fitoptions( ft );
opts.Lower = [-Inf -Inf];
opts.Upper = [Inf Inf];

% Fit model to data.
[fitresult, gof] = fit( xData, yData, ft, opts );

% Plot fit with data.
figure( 'Name', titulo );
h = plot( fitresult, xData, yData );
legend( h, 'Ea vs. Humedad', 'Ajuste de la curva', 'Location', 'NorthEast' );
% Label axes
xlabel( 'Humedad ' );
ylabel( 'Ea ' );
grid on
```

Figura 94: Código Matlab correspondiente al módulo CrearAjusteEa.

CAPÍTULO 6: RESULTADOS

A continuación se presentan los resultados obtenidos, mediante el programa desarrollado. Como se ha explicado anteriormente, el objetivo del programa es ajustar los resultados de los ensayos de envejecimiento de papeles aislantes realizados en el Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Carlos III de Madrid a un modelo de envejecimiento, obteniendo los valores de los parámetros del modelo para ensayos realizados en distintas condiciones. Además, se comparan estos resultados con los obtenidos por otros autores como Lelekakis, Emsley y Lundgaard.

6.1 RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE ENVEJECIMIENTO

En la tabla 14 se muestran los valores máximo, mínimo y la mediana de los valores de k para los diferentes ensayos de envejecimiento realizados, dado que para cada condición de temperatura y humedad, se han realizado varias tomas de datos.

Para calcular los valores de k se utiliza la siguiente ecuación:

$$\frac{1}{DP_t} - \frac{1}{DP_0} = kt$$

Temperatura(°C)	Humedad (%)	$K_{\min}(h^{-1})$	$K_{\max}(h^{-1})$	$K_{\text{mediana}}(h^{-1})$
130	1,01	1,1815E-06	2,0373E-06	1,25E-06
130	1,94	1,7581E-06	3,261E-06	2,1678E-06
130	2,92	2,518E-06	4,2185E-06	3,177E-06
120	0,89	4,1539E-07	1,5777E-06	6,3911E-07
120	1,03	5,7127E-07	2,5203E-06	1,2007E-06
120	2,47	1,4261E-06	4,6799E-06	2,1447E-06
120	4,28	2,3726E-06	7,0907E-06	4,0054E-06
110	0,11	4,1549E-06	1,0647E-07	5,2902E-07
110	1,01	4,260E-06	1,1184E-07	5,468E-07
110	1,94	5,1226E-06	1,3858E-07	6,3182E-07
110	2,92	6,6485E-06	1,448E-07	7,6366E-07

Tabla 14: Valores máximos, mínimos y la mediana de k .

Como se puede comprobar el orden de magnitud de los valores de k es el mismo que el obtenido por Lelekakis (Tablas 15, 16 y 17). Pero si comparamos los valores de k_{\max} y k_{\min} para cada ensayo de envejecimiento, la diferencia entre los dos valores es relativamente alta. Esto puede deberse a la gran diferencia entre los valores de oxígeno correspondientes a un proceso de envejecimiento determinado. Por ejemplo, para el ensayo de envejecimiento correspondiente a 110°C y una humedad de 0,11 %, tenemos 13 tomas de datos que van desde valores tan bajos de oxígeno de 1.942 ppm hasta valores tan elevados como 22.198 ppm.

	Humedad (%)		
Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	0,5	1,6	2,7
100			0,62E-06
120		1,48E-06	2,40E-06
130		2,32E-06	
140	1,21E-06	5,79E-06	12,84E-06
160	6,18E-06		

Tabla 15: Valores de k para papel Kraft a para una concentración de oxígeno baja obtenidos por Lelekakis.

	Humedad (%)		
Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	0,5	1,6	2,7
100		0,45E-06	
120	1,41E-06	3,10E-06	9,05E-06

Tabla 16: Valores de k para papel Kraft con una concentración de oxígeno media (7000-14000 ppm) obtenidos por Lelekakis.

	Humedad (%)		
Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	0,5	1,6	2,7
100	0,38E-06	0,74E-06	1,34E-06
120	1,53E-06	6,19E-06	8,31E-06
140	5,38E-06		

Tabla 17: Valores de k para papel Kraft con una concentración de oxígeno alta (16500-25000 ppm) obtenidos por Lelekakis.

Las siguientes gráficas muestran las curvas de envejecimiento obtenidas a partir de los ensayos realizados en la UC3M para cada temperatura y humedad:

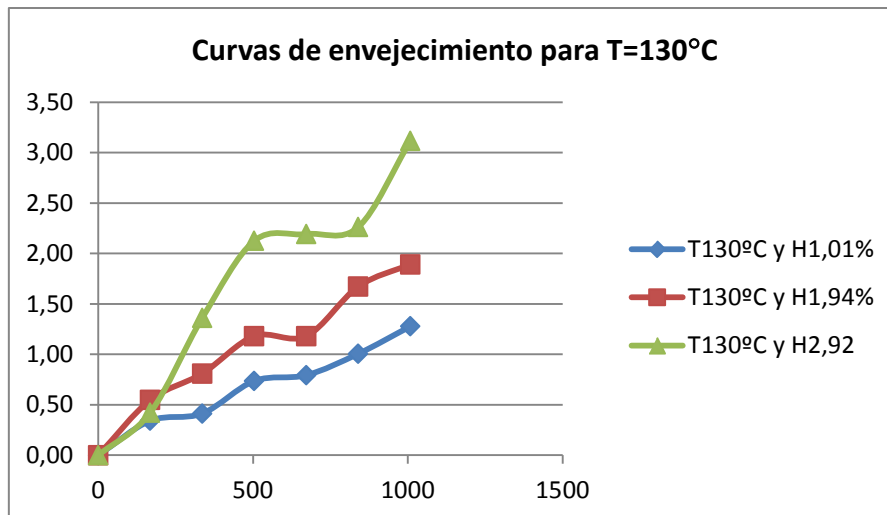


Figura 95: Curvas de envejecimiento para T=130°C

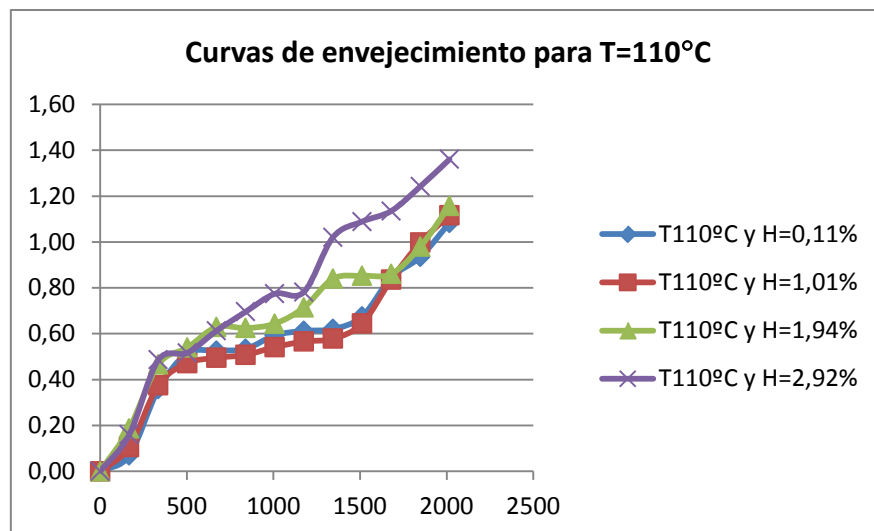


Figura 96: Curvas de envejecimiento para T=110°C

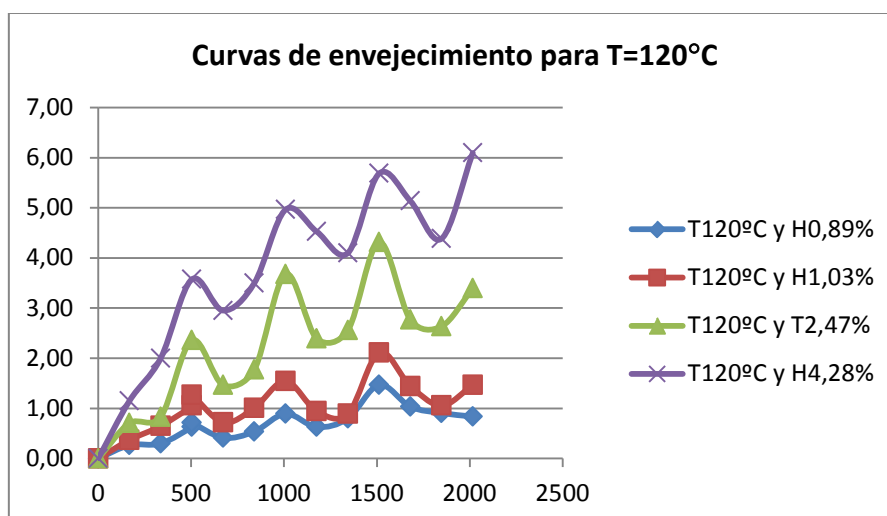


Figura 97: Curvas de envejecimiento para T=120°C

Se puede comprobar en las gráficas anteriores que la degradación del papel aumenta con la humedad para cada temperatura. Además, si hacemos una comparación global de la degradación del papel para las tres temperaturas, esta degradación aumenta con la temperatura.

Por otro lado, se puede observar en la figura 97, correspondiente a las curvas de envejecimiento para una temperatura de 120 °C, que dichas curvas presentan grandes oscilaciones. Esto se debe a que los viales para las semanas 3, 6, 9 y 12, se encontraban en la base del horno, donde la temperatura es superior a la de las baldas del horno, por lo que el envejecimiento de esas muestras es superior al de las semanas anterior y posterior. Por este motivo, se han eliminado los puntos correspondientes a estas semanas para realizar los ajustes de los ensayos que se expondrán a continuación.

6.2 AJUSTE DE LOS RESULTADOS DE LOS ENSAYOS AL MODELO DE EMSLEY

Los resultados de los diferentes ensayos realizados se han ajustado a una línea recta.

$$\frac{1}{DP_t} - \frac{1}{DP_0} = kt$$

Al realizar el ajuste se ha exigido que todas las rectas pasen por el origen de coordenadas. El valor de k nos lo proporciona la pendiente de la recta.

Para ajustar los ensayos de envejecimiento llevados a cabo para una temperatura de 120 °C se han eliminado los puntos correspondientes a las semanas 3, 6, 9 y 12, como se ha indicado en el apartado anterior. También se ha eliminado el punto correspondiente a la semana tres para una temperatura de 110°C con una humedad de 0,11% y 1,01%, ya que de esta manera se consigue un mejor ajuste, aumentando el R-cuadrado.

A continuación se indican los puntos eliminados para cada ensayo de temperatura y humedad (Tabla 18):

Temperatura (°C)	Humedad (%)	Puntos eliminados
130	1,01	Ninguno
130	1,94	Ninguno
130	2,92	Ninguno
120	0,89	4, 5, 8, 11 y 14
120	1,03	4, 5, 8, 11 y 13
120	2,47	4, 7, 10 y 12
120	4,28	4, 7 y 12
110	0,11	4
110	1,01	4
110	1,94	Ninguno
110	2,92	Ninguno

Tabla 18: Puntos eliminados de cada ensayo de envejecimiento.

En la tabla 19 se muestran los valores obtenidos del ajuste de la curva $\left(\frac{1}{DP_t} - \frac{1}{DP_0}\right)$ a una línea recta.

Además, en la tabla 19 se muestran los valores máximo y mínimo del intervalo de confianza 95% y el coeficiente de determinación R-cuadrado de la bondad del ajuste.

Temperatura(°C)	Humedad (%)	$K_{\min}(h^{-1})$	$K_{\max}(h^{-1})$	$K_{\text{ajuste}}(h^{-1})$	R-cuadrado
130	1,01	1,1146E-06	1,1373E-06	1,259E-06	0,97055
130	1,94	2,6288E-06	3,622E-06	3,16E-06	0,9254
130	2,92	1,745E-06	2,201E-06	1,9729E-06	0,94742
120	0,89	5,684E-07	6,365E-07	5,6843E-07	0,91632
120	1,03	6,627E-07	9,717E-07	8,1722E-07	0,7698
120	2,47	1,632E-06	1,994E-06	1,8126E-6	0,94329
120	4,28	2,989E-06	3,765E-06	3,3766E-06	0,8993
110	0,11	4,722E-07	5,71E-07	5,2159E-07	0,90977
110	1,01	4,656E-07	5,697E-07	5,1765E-07	0,90274
110	1,94	5,215E-07	6,67E-07	5,9426E-07	0,79136
110	2,92	6,595E-07	7,696E-07	7,1457E-07	0,93

Tabla 19: Ajuste de las gráficas de $\left(\frac{1}{DP_t} - \frac{1}{DP_0}\right)$.

Se puede comprobar en la tabla 19 que los valores de R-cuadrados obtenidos en los ajustes, en general, son superiores a 0,9 por lo que se pueden considerar unos ajustes adecuados.

Las siguientes gráficas muestran los ajustes obtenidos mediante el programa:

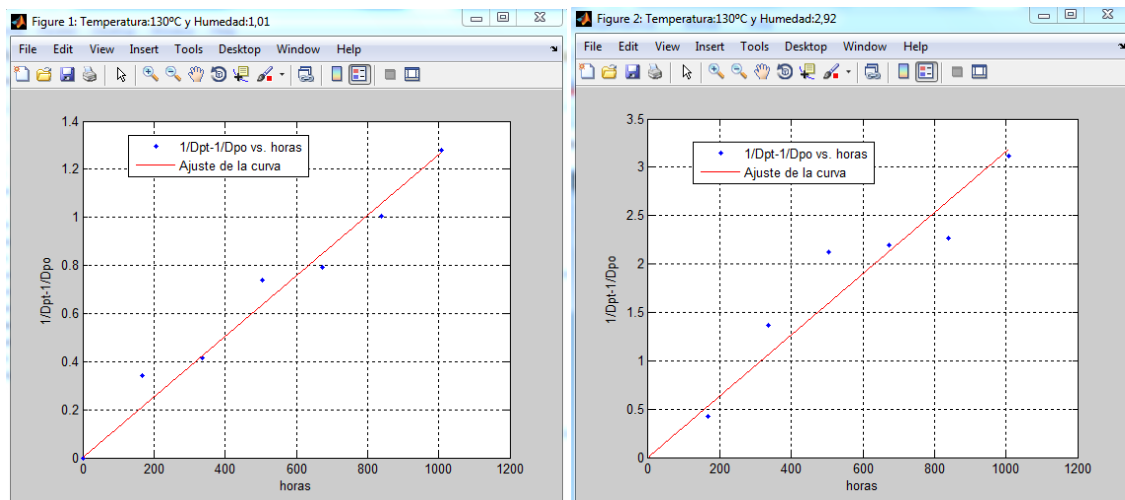


Figura 98: Ajuste de las curvas de envejecimiento correspondientes a $T=130^{\circ}\text{C}$ y $H=1,01$ y $H=2,92$.

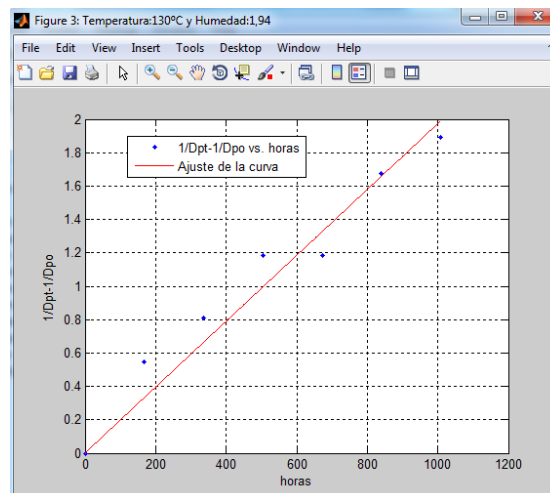


Figura 99: Ajuste de las curvas de envejecimiento correspondientes a $T=130^{\circ}\text{C}$ y $H=1,94$.

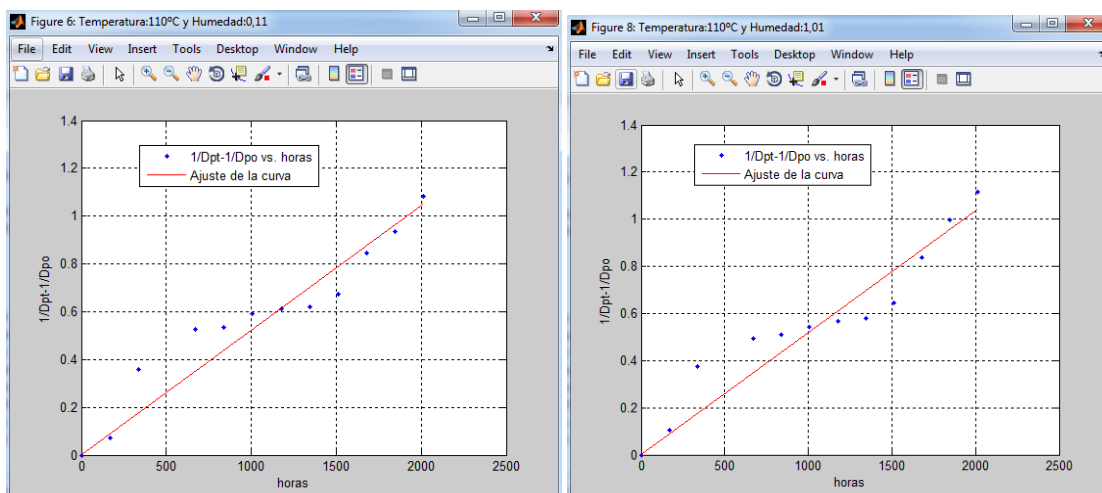


Figura 100: Ajuste de las curvas de envejecimiento correspondientes a $T=110^{\circ}\text{C}$ y $H=0,11$ y $H=1,01$.

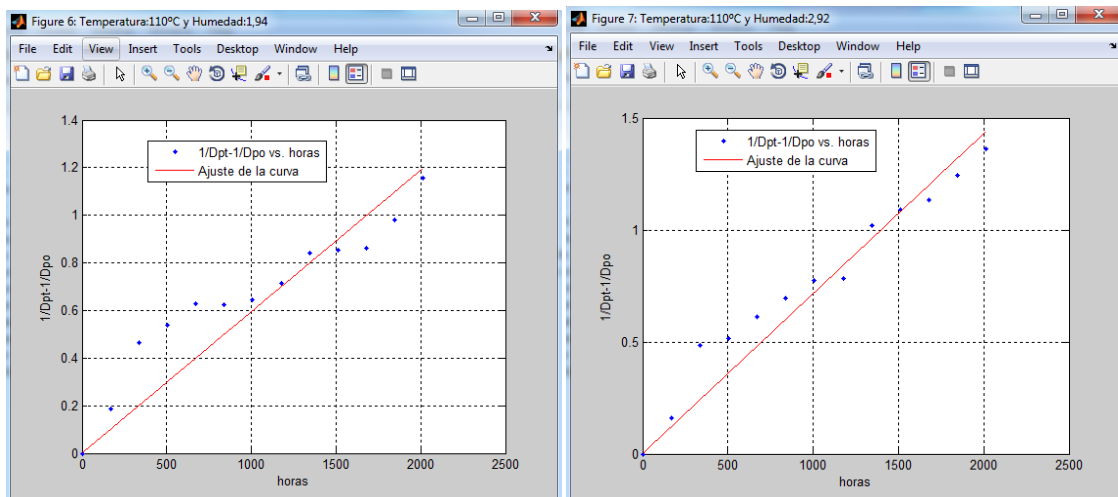


Figura 101: Ajuste de las curvas de envejecimiento correspondientes a $T=110^{\circ}\text{C}$ y $H=1,94$ y $H=2,92$.

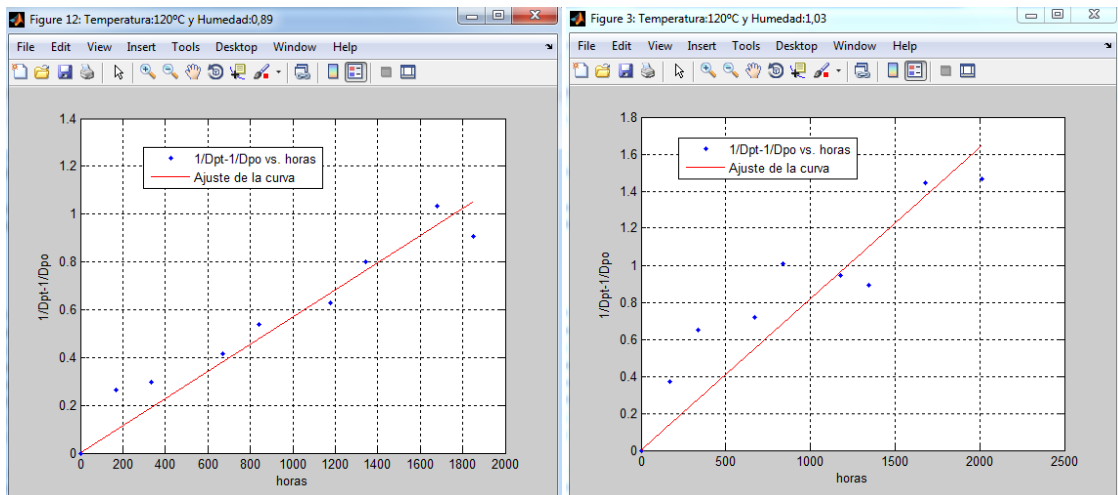


Figura 102: Ajuste de las curvas de envejecimiento correspondientes a $T=120^{\circ}\text{C}$ y $H=0,89$ y $H=1,03$.

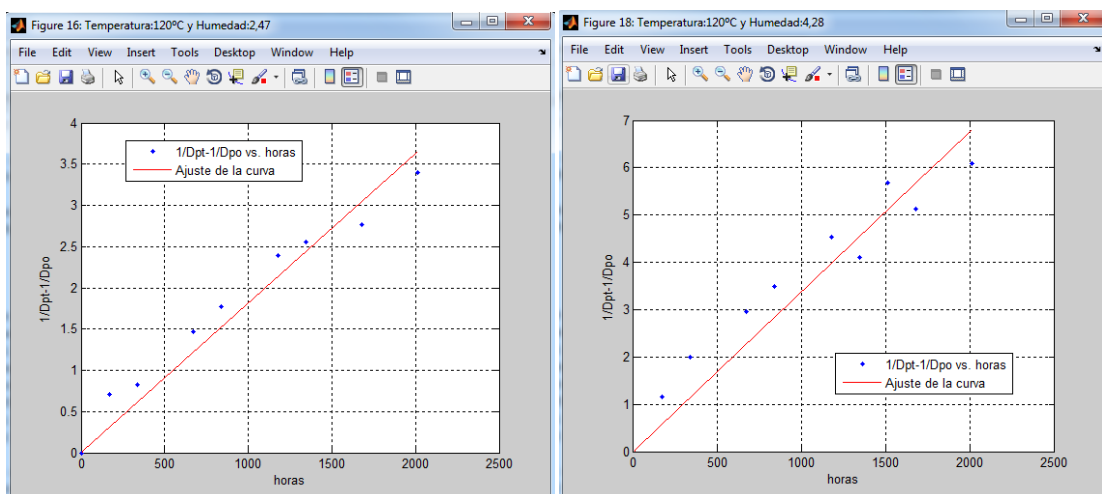


Figura 103: Ajuste de las curvas de envejecimiento correspondientes a $T=130^{\circ}\text{C}$ y $H=2,47$ y $H=4,28$.

6.3 EVOLUCIÓN DE LOS VALORES DE A CON LA HUMEDAD

Valores de A (Tabla 20) obtenidos a partir del ajuste mediante la ecuación:

$$A = k \cdot e^{\frac{E_a}{RT}}$$

Temperatura(°C)	Humedad (%)	A (h ⁻¹)
130	1,01	3,0757E+08
130	1,94	4,8175E+08
130	2,92	7,7165E+08
120	0,89	3,2248E+08
120	1,03	4,6363E+08
120	2,47	1,0283E+09
120	4,28	1.9156E+09
110	0,11	7,1842E+08
110	1,01	7,1299E+08
110	1,94	8,1851E+08
110	2,92	9,8421E+08

Tabla 20: Valores de A obtenidos en la UC3M.

Según Lelekakis, la evolución de A con el contenido en agua depende del contenido en oxígeno, bajo (menos de 6000 ppm), medio (entre 7000 y 14000 ppm) y alto (mayor de 16000 ppm).

Dado que la concentración de oxígeno para cada ensayo varía, se dividirán los ensayos según el contenido de oxígeno para poder comparar nuestros valores obtenidos con los valores obtenidos por los otros autores.

6.3.1 Evolución de los valores de A con la humedad, obtenida a partir de los ensayos realizados por la Universidad Carlos III

Las siguientes gráficas muestran la evolución de los valores de A para cada temperatura y humedad, obtenidas a partir los ensayos realizados por Universidad Carlos III:

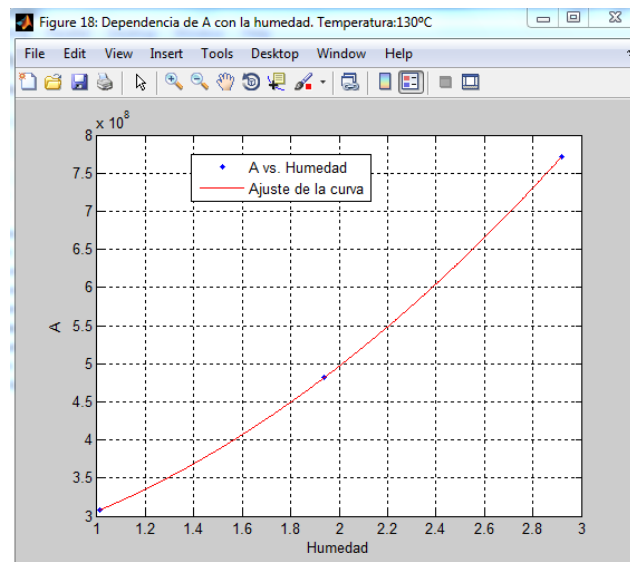


Figura 104: Ajuste de los valores de A frente a la humedad obtenidos por la UC3M para una temperatura de 130 °C.

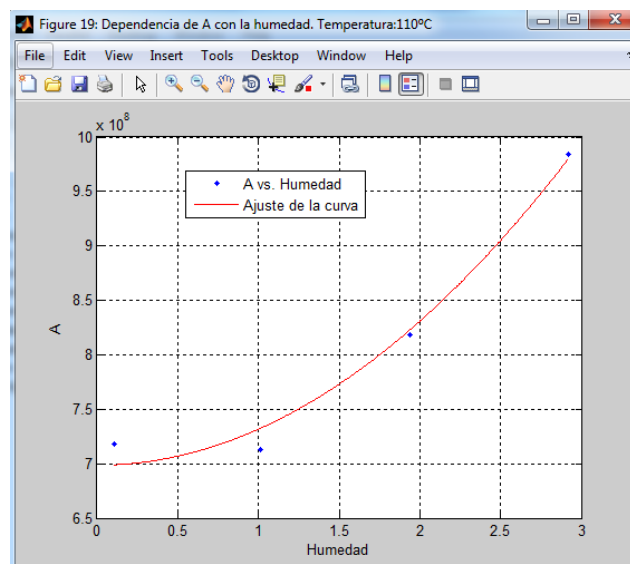


Figura 105: Ajuste de los valores de A frente a la humedad obtenidos por la UC3M para una temperatura de 110 °C.

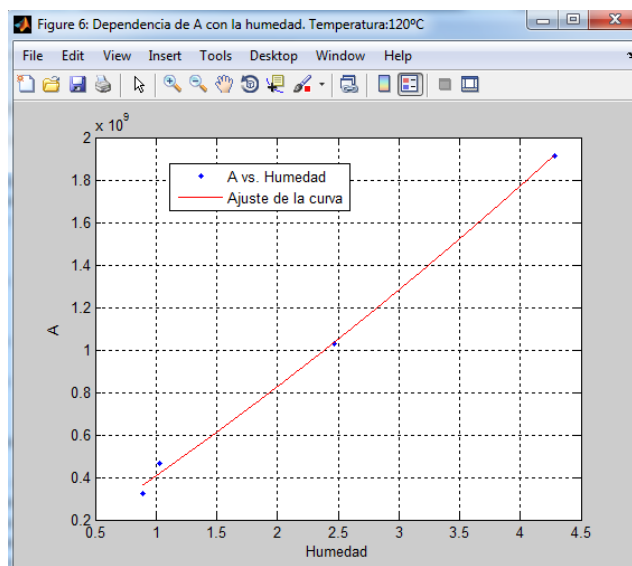


Figura 106: Ajuste de los valores de A frente a la humedad obtenidos por la UC3M para una temperatura de 120 °C.

Se puede comprobar en las gráficas anteriores que el valor de A aumenta con la humedad para cada temperatura. Aunque hay que señalar que en el caso de 110°C (Figura 105) para una humedad de 0,11% y 1,01%, no sigue una tendencia de aumento, produciéndose una pequeña reducción del valor de A. Este motivo puede deberse a las diferencias de concentraciones de oxígeno entre estas dos condiciones de humedad, ya que según Lelekakis el valor de A depende del contenido de oxígeno.

6.3.2 Ensayos de envejecimiento realizados con un contenido de oxígeno bajo

En la tabla 21 se comparan los valores de A obtenidos por la aplicación a partir de los experimentos realizados en la Universidad Carlos III, con los resultados obtenidos por Emsley, Lundgaard y Lelekakis.

	UC3M			Emsley	Lundgaard	Lelekakis
Humedad (%)	T(°C)	Oxígeno(ppm)	A (h ⁻¹)	A (h ⁻¹)	A (h ⁻¹)	A (h ⁻¹)
0,25				1,10E+08	2,00E+08	
0,5						1,42E+08
0,89	120	5.387	3,2248E+08			
1,01	130	5.712	3,0757E+08	3,50E+08		
1,03	120	5.315	4,6363E+08			
1,5					6,20E+08	
1,6						6,80E+08
2				7,80E+08		
2,47	120	4.942	1,0283E+09			
2,7						1,65E+09
4				3,50E+09		
4,1					2,10E+09	
4,28	120	4.844	1,9156E+09			

Tabla 21: Valores de A obtenidos por la Universidad Carlos III y valores de A reportados por diferentes autores con contenido de oxígeno bajo.

Se puede ver que los valores obtenidos a partir de los ensayos de la Universidad Carlos III son bastante semejantes a los valores obtenidos por Emsley, Lundgaard y Lelekakis.

En la figura 107 se muestra la evolución de A con el contenido de humedad a partir de los valores obtenidos por los diferentes autores y el ajuste de dichos puntos a una línea recta se muestra en la figura 108.

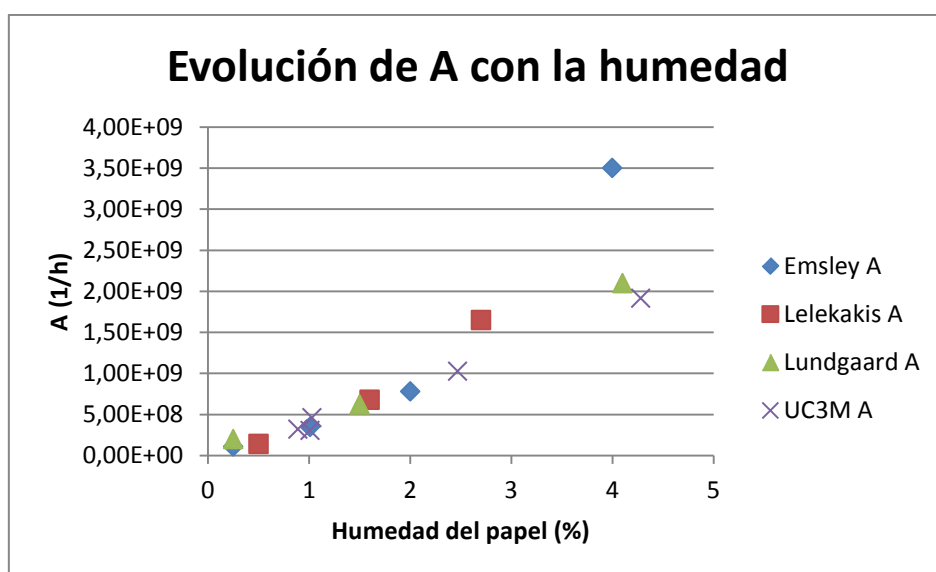


Figura 107: Evolución de los valores de A reportados por los diferentes autores (Emsley, Lundgaard, Lelekakis y UC3M) para un contenido en oxígeno bajo.

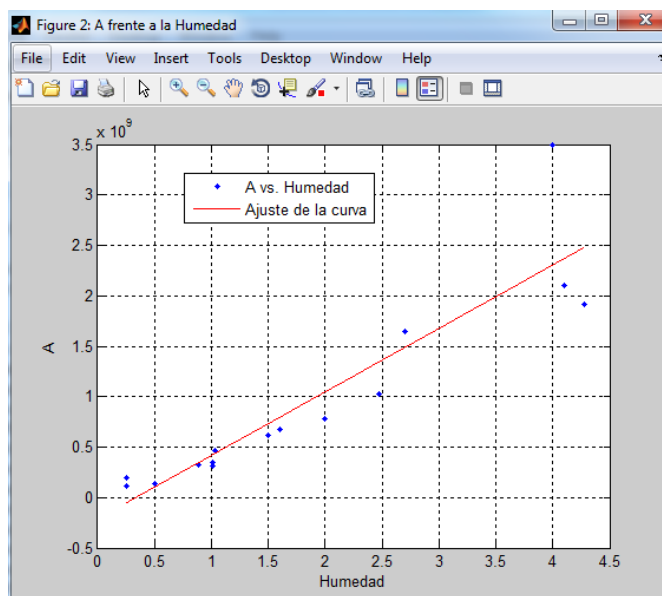


Figura 108: Ajuste lineal de los valores de A frente a la humedad reportados por los diferentes autores (Emsley, Lundgaard, Lelekakis y UC3M) para un contenido en oxígeno bajo.

Este ajuste no es muy bueno debido a que el coeficiente R-cuadrado tiene un valor de 0,8315 y para una humedad nula, el valor de A es negativo ($-2,128\text{E}+08$).

Ajustando de nuevo la evolución a una nueva función de segundo grado (Figura 109), tampoco arroja un mejor ajuste, ya que el coeficiente R-cuadrado obtenido es de 0,8394 y el valor de A, para una humedad nula, es de $-3,177\text{E}+07$.

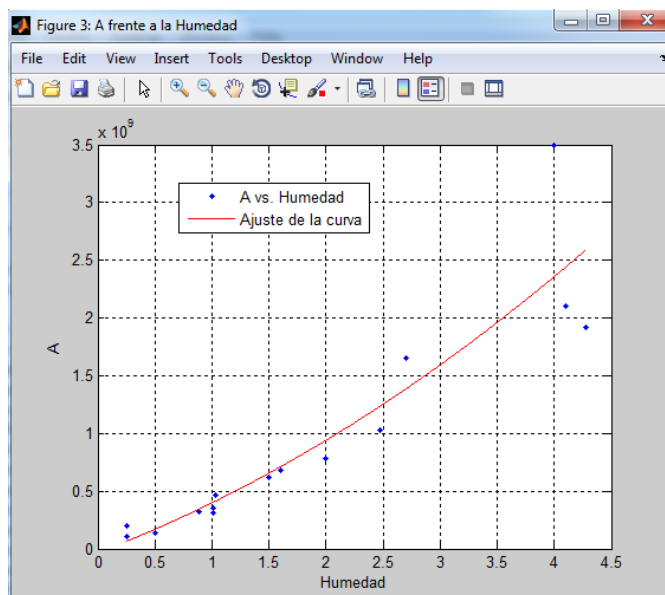


Figura 109: Ajuste a un polinomio de grado 2 de los valores de A frente a la humedad reportados por los diferentes autores (Emsley, Lundgaard, Lelekakis y UC3M) para un contenido en oxígeno bajo.

En la búsqueda de un mejor ajuste se han tomado dos medidas:

- Eliminar el punto (4; 3,5E+09) obtenido por Emsley, ya que observando la figura 107, claramente se aleja de la tendencia principal.
- Forzar a que el valor de A para una humedad nula sea cero.

De esta manera, obtenemos los ajustes de la figura 110 con un ajuste lineal y la figura 111 con un ajuste a una ecuación de segundo grado.

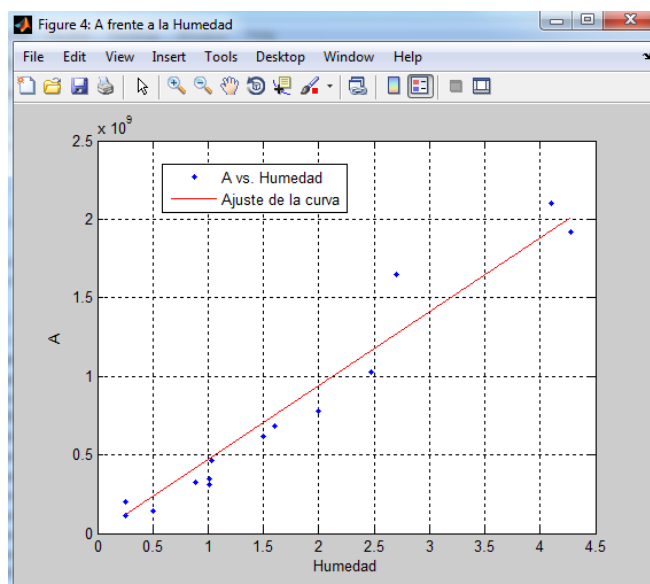


Figura 110: Ajuste lineal de los valores de A frente a la humedad reportados por los diferentes autores (Emsley, Lundgaard, Lelekakis y UC3M), eliminando el punto (4; 3,5E+08) de Emsley y forzando a que la curva ajustada pase por el origen, para un contenido en oxígeno bajo.

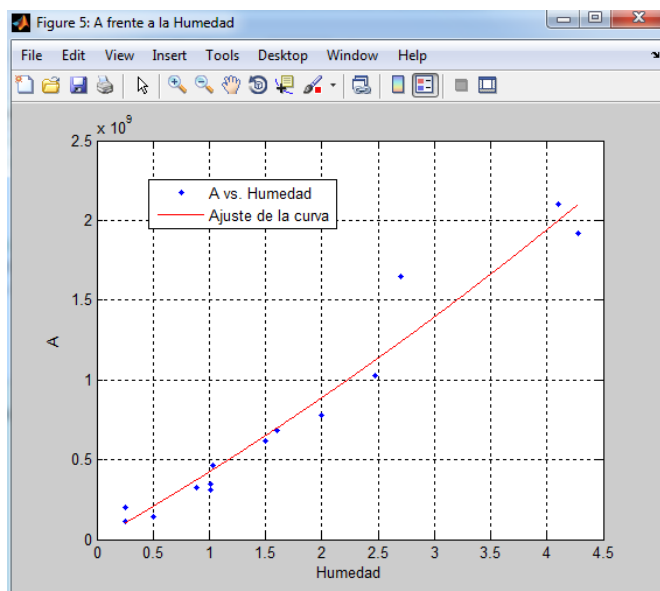


Figura 111: Ajuste a un polinomio de grado 2 de los valores de A frente a la humedad reportados por los diferentes autores (Emsley, Lundgaard, Lelekakis y UC3M), eliminando el punto (4; 3,5E+08) de Emsley y forzando a que la curva ajustada pase por el origen, para un contenido en oxígeno bajo.

En estas condiciones el coeficiente R- cuadrado tiene un valor de 0,9467 para un ajuste lineal y 0,9527 con un ajuste a una ecuación de segundo grado. De esta manera obtenemos la siguiente curva de ajuste para el caso envejecimiento con contenido bajo de oxígeno:

$$A = 2,066 \cdot 10^7 \cdot H^2 + 4,025 \cdot 10^8 \cdot H$$

Donde H es el contenido en humedad.

6.3.3 Ensayos de envejecimiento realizados con un contenido de oxígeno medio

En la tabla 22 se muestran los valores de A obtenidos por la aplicación a partir de los experimentos realizados en la Universidad Carlos III y los valores de A obtenidos por Lelekakis.

Se puede ver que para humedades medias y altas los valores obtenidos por Lelekakis son bastante diferentes a los obtenidos por nosotros. Esto no pasaba en el caso de contenido en oxígeno bajo donde los valores eran bastante parecidos.

	UC3M			Lelekakis
Humedad (%)	T (°C)	Oxígeno (ppm)	A (h ⁻¹)	A (h ⁻¹)
0,11	110	8.636	7,1842E+08	
0,5	120			8,00E+08
1,01	110	7.040	7,1299E+08	
1,6	100			1,58E+09
1,6	120			1,76E+09
1,94	130	7.320	4,8175E+08	
1,94	110	9.089	8,1851E+08	
2,7	120			5,13E+09
2,92	130	10.165	7,7165E+08	
2,92	110	7.949	9,8421E+08	

Tabla 22: Valores de A obtenidos en la Universidad Carlos III y valores de A reportados por Lelekakis con contenido de oxígeno medio.

En la siguiente gráfica (Figura 112) se muestran estos valores de A obtenidos en la Universidad Carlos III y los obtenidos por Lelekakis para ver mejor la comparación.

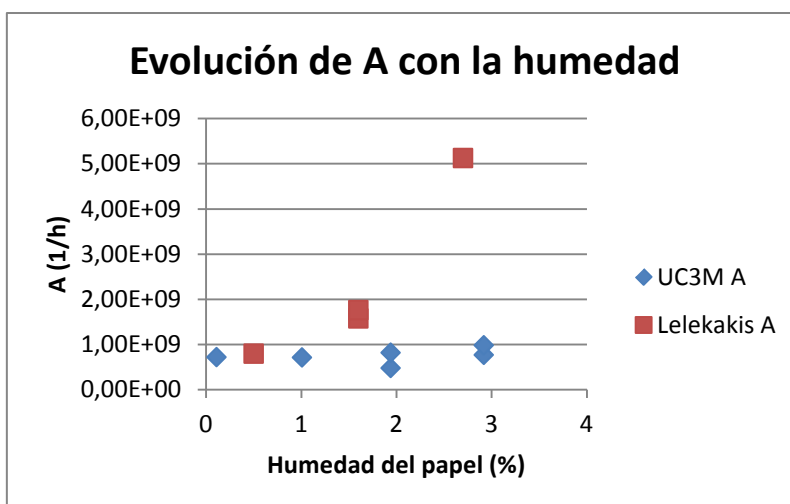


Figura 112: Evolución de los valores de A obtenidos en la UC3M y obtenidos por Lelekakis para un contenido medio en oxígeno.

Los valores obtenidos en los ensayos realizados en la UC3M parecen que siguen una tendencia de crecimiento al aumentar la humedad de los ensayos, pero para una humedad de 1,94% y 2,92%, la diferencia entre los valores obtenidos para una temperatura de 110°C y 130°C es elevada.

En la figura 113 se muestra el ajuste de A en función de la humedad. Para hacer este ajuste se han utilizado sólo los valores de A obtenidos por la UC3M, debido a que difieren bastante de los valores de Lelekakis, y se han eliminado los valores de A correspondientes a una humedad de 1,94% y 2,92% para una temperatura de 130°C. Todos estos cambios se han realizado debido a que el coeficiente de correlación resulta muy reducido.

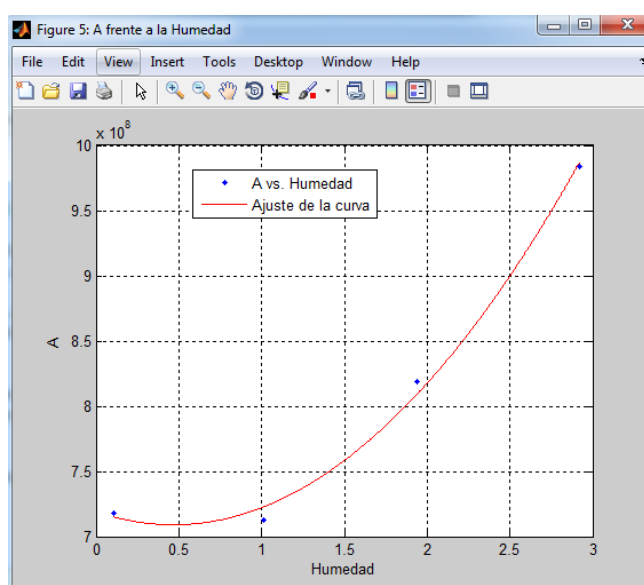


Figura 113: Ajuste de los valores de A frente a la humedad obtenidos por la UC3M para el caso de contenido en oxígeno medio.

En estas condiciones el coeficiente R-cuadrado tiene un valor de 0,9959. De esta manera obtenemos la siguiente curva de ajuste para el caso envejecimiento con contenido medio de oxígeno:

$$A = 4,629 \cdot 10^7 \cdot H^2 - 4,34 \cdot 10^7 \cdot H + 7,193 \cdot 10^8$$

Debido a las condiciones en las que se ha hecho el ajuste y se ha obtenido dicha ecuación, hay que dar una fiabilidad relativa a esta ecuación.

6.4 EVOLUCIÓN DEL LN(K) FRENTE A 1/T. OBTENCIÓN DE LA ENERGÍA DE ACTIVACIÓN

Las siguientes gráficas muestran la dependencia del valor de k con la inversa de la temperatura. Para el caso de 1% de humedad (aproximadamente) se dispone de tres valores de k, para 1,94% de humedad y 2,92% de humedad, sólo se dispone de dos valores y para el resto de humedades, únicamente se dispone de un valor de k.

La energía de activación se obtiene mediante la pendiente de las rectas que proporcionan el ln(k) frente a la inversa de la temperatura.

Por ejemplo: para el caso de 1,01% de humedad, la energía de activación se obtiene se la siguiente manera:

$$\frac{E_a}{R} = 6853$$

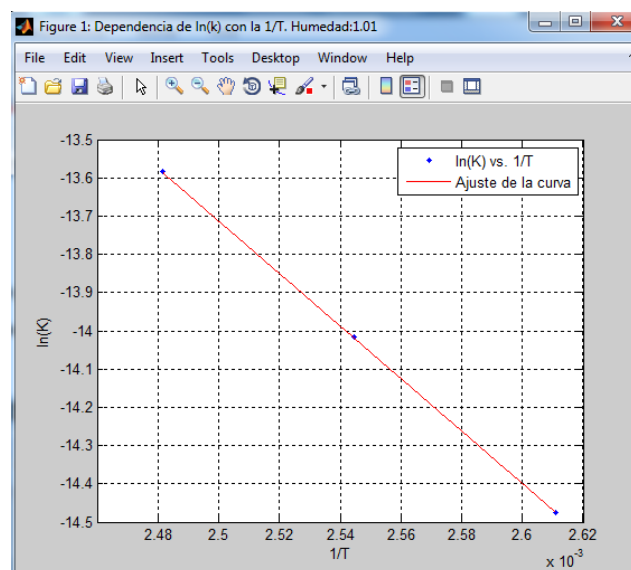


Figura 114: Ajuste del ln(k) frente a 1/T para una humedad de 1,01%.

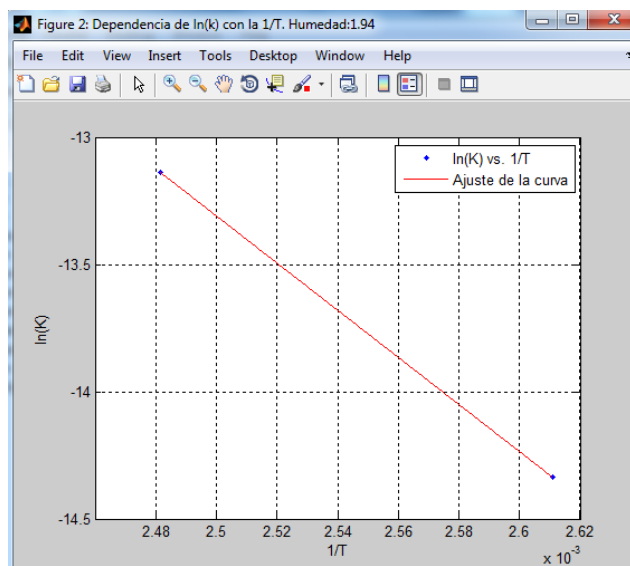


Figura 115: Ajuste del $\ln(k)$ frente a $1/T$ para una humedad de 1,94%.

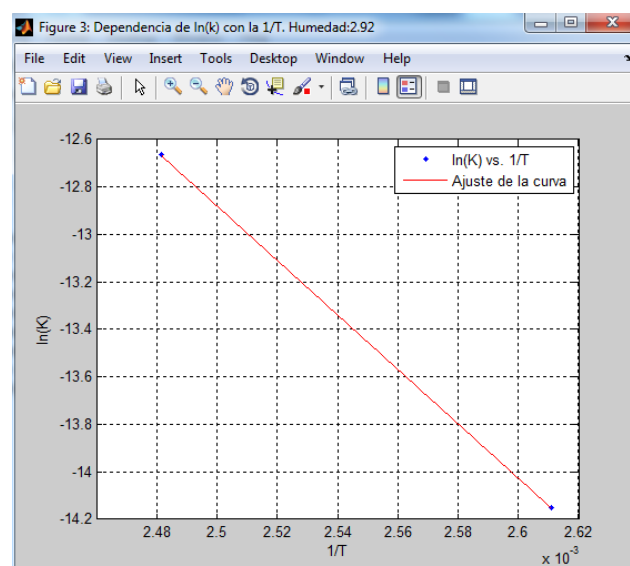


Figura 116: Ajuste del $\ln(k)$ frente a $1/T$ para una humedad de 2,92%.

Para el caso de 1,01% de humedad nos sale un valor de $E_a = 57,0573$ kJ/mol, resultando ser un valor muy diferente de los obtenidos por Emsley (111 kJ/mol), Lundgaard (128 kJ/mol) y Lelekakis (entre 121 y 92 kJ/mol, dependiendo de la humedad).

Para el caso de 1,94% de humedad y de 2,92% de humedad, cuyo contenido de oxígeno era medio, nos sale un valor de $E_a = 76,9935$ kJ/mol y $E_a = 95,3924$ kJ/mol. Estos valores de E_a se asemejan parcialmente a los obtenidos por Lundgaard (89 kJ/mol) y por Lelekakis (118 kJ/mol).

Las diferencias entre los resultados de los ajustes al usar los ensayos realizados por la Universidad Carlos III y los obtenidos por otros autores, pueden deberse a que en el caso de los ensayos de la UC3M se introdujo cobre en los viales del ensayo. El cobre puede actuar como un catalizador de las reacciones de envejecimiento del papel y del aceite.

6.4.1 Evolución de la energía de activación con la humedad

En la siguiente gráfica (Figura 117) se muestra el ajuste de las energías de activación con la humedad, obteniendo la siguiente ecuación:

$$Ea = 20,06 \cdot H + 37,23$$

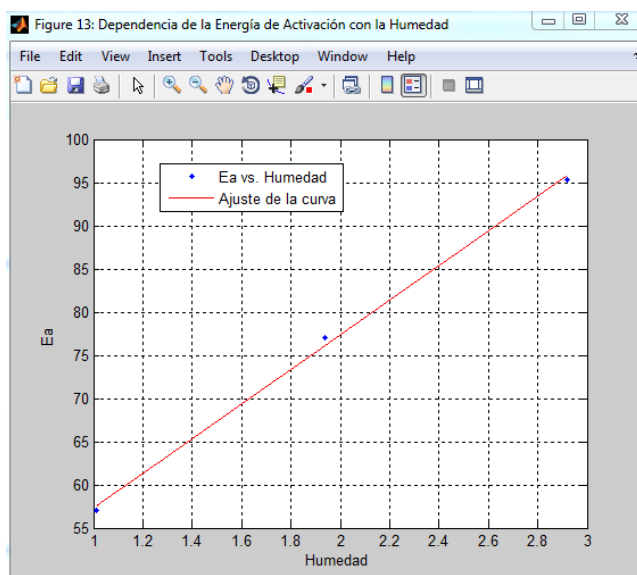


Figura 117: Ajuste de las energías de activación con la humedad.

6.5 MODELO DE ENVEJECIMIENTO OBTENIDO

A lo largo de este capítulo se han obtenido los parámetros del modelo de envejecimiento propuesto por Emsley:

$$\frac{1}{DP_t} - \frac{1}{DP_0} = kt$$

Siendo

$$k = Ae^{\frac{-E_a}{RT}}$$

El valor del parámetro A se ha obtenido en apartados anteriores en función de la humedad para un contenido en oxígeno bajo y medio.

Dado que el valor de A en función de la humedad varía con el contenido de oxígeno, se han obtenido dos ecuaciones que permiten estimar el envejecimiento del papel aislante en función de la humedad, la temperatura y el contenido en oxígeno. Las ecuaciones resultantes son las siguientes:

- Para baja concentración de oxígeno:

$$\frac{1}{DP_t} - \frac{1}{DP_0} = \left((2,066 \cdot 10^7 \cdot H^2 + 4,025 \cdot 10^8 \cdot H) e^{\frac{-(20,06 \cdot H + 37,23)}{RT}} \right) \cdot t$$

- Para media concentración de oxígeno:

$$\frac{1}{DP_t} - \frac{1}{DP_0} = \left((4,629 \cdot 10^7 \cdot H^2 - 4,34 \cdot 10^7 \cdot H + 7,193 \cdot 10^8) e^{\frac{-(20,06 \cdot H + 37,23)}{RT}} \right) \cdot t$$

CAPÍTULO 7: CONCLUSIONES

7.1 RESUMEN

El presente Trabajo tiene como finalidad el desarrollo y la mejora de un programa realizado en [7] que permita obtener los parámetros del modelo de envejecimiento propuesto por Emsley [4] a partir del ajuste de los diferentes valores obtenidos en los ensayos de envejecimiento realizados en la Universidad Carlos III de Madrid.

Para abordar mejor el trabajo y tener un mayor conocimiento sobre transformadores, se ha explicado brevemente el funcionamiento del transformador y los elementos que forman parte de él.

Dado que la operación continua del transformador depende del estado del papel aislante, se ha explicado la composición de dicho papel, los factores que producen su descomposición (humedad, temperatura y oxígeno), dando lugar a tres reacciones químicas (hidrólisis, oxidación y pirólisis) y los efectos que producen. Estos efectos son la disminución del grado de polimerización del papel aislante, que produce una reducción de la resistencia mecánica del mismo. Este grado de polimerización tiene un valor inicial que se encuentra alrededor de 1000 y se reducirá hasta un valor de 200, donde la industria considera que un valor por debajo de este, el papel pierde todas sus propiedades mecánicas y puede estar sujeto a daños.

Con el tiempo, la industria ha intentado buscar un valor numérico aproximado de la vida del transformador, en el que el aislamiento sólido es el elemento que determina la vida del transformador, desarrollando una serie de métodos (las guías de carga, la obtención del DP de manera directa y la obtención del DP a partir del contenido de furanos en el aceite). Se ha realizado una revisión bibliográfica sobre dichos métodos y se ha centrado el trabajo en el modelo publicado por Emsley, que es ampliamente aceptado por la comunidad científica internacional para describir el envejecimiento del aislamiento celulósico.

Emsley publicó un modelo de envejecimiento que proporciona el grado de polimerización del papel en función de la temperatura. En dicho modelo la degradación del papel se ajusta a una ecuación de orden cero, que corresponde a la siguiente ecuación:

$$\frac{1}{DP_t} - \frac{1}{DP_0} = kt$$

Siendo

$$k = Ae^{\frac{-E_a}{RT}}$$

Para poder aplicar este modelo se debe obtener una serie de parámetros de forma experimental, por lo que se ha llevado a cabo una revisión bibliográfica sobre los diferentes estudios que se han realizado posteriores a la publicación del modelo de Emsley, en los que se describen y obtienen los valores de los parámetros.

Realizada esta revisión bibliográfica, se ha desarrollado un programa que consiste en una aplicación informática que integra un ejecutable Matlab y un libro Excel, donde se encuentran los datos de los ensayos de envejecimiento realizados. Este programa permite obtener los valores de los parámetros del modelo de Emsley a partir del ajuste de los diferentes valores obtenidos en los experimentos realizados en la Universidad Carlos III. De esta manera podremos determinar un modelo que calcule la vida del aislamiento celulósico.

Una vez realizados los ajustes y obtenidos los resultados, se han comparado estos resultados con los obtenidos por otros autores (Lelekakis, Emsley y Lundgaard).

Finalmente se han obtenido dos ecuaciones que permiten estimar el envejecimiento del papel en función de su temperatura de operación, su contenido de humedad y su temperatura.

7.2 CONCLUSIONES

Los ensayos de envejecimiento realizados en la Universidad Carlos III de Madrid se ajustan bien al modelo de Emsley con unos valores de R-cuadrado de los ajustes buenos, generalmente superiores a 0,9.

Se ha comprobado que las curvas de envejecimiento obtenidas a partir de los ensayos realizados siguen una degradación similar a las degradaciones obtenidas por otros autores, aumentando la degradación del papel con la humedad y la temperatura.

También, se ha verificado que los valores de A obtenidos, aumentan con la humedad para cada temperatura. Aunque hay que señalar que en el caso de 110°C para una humedad de 0,11% y 1,01%, no sigue una tendencia de aumento, produciéndose una pequeña reducción del valor de A. Este motivo puede deberse a las diferencias de concentraciones de oxígeno entre estas dos condiciones de humedad, ya que según Lelekakis el valor de A depende del contenido de oxígeno.

Debido a estas diferencias en las concentraciones de oxígeno, se han dividido los ensayos en baja y media concentración de oxígeno, para hacer una comparación con los valores de A obtenidos por los otros autores. Para el caso de los experimentos realizados con un contenido en oxígeno bajo, los valores de A obtenidos por la aplicación son semejantes a los obtenidos por otros autores. Se ha comprobado que los valores de A aumentan con la humedad y se han ajustado estos valores de A obtenidos por los diferentes autores junto a los obtenidos por nosotros, a una ecuación de segundo grado. De esta manera se ha obtenido una curva de ajuste para el caso de envejecimiento con contenido bajo de oxígeno.

Los experimentos realizados con un contenido medio de oxígeno arrojan valores de A muy diferentes a los obtenidos por Lelekakis. Por este motivo se han ajustado sólo los valores obtenidos por nosotros, comprobando que el valor de A aumenta con la humedad y ajustando estos valores a una ecuación de segundo grado. De esta manera se ha obtenido una nueva curva de ajuste para el caso de envejecimiento con contenido medio en oxígeno. Aunque hay que señalar que a esta ecuación le tenemos que dar una fiabilidad relativa debido a las condiciones con las que se ha obtenido.

Se ha obtenido la energía de activación a partir de los resultados obtenidos de los ensayos de envejecimiento realizados en la Universidad Carlos III. Para el caso de una concentración baja en oxígeno, los resultados obtenidos tienen un valor muy diferente de los obtenidos por los otros autores. Sin embargo, en el caso de media concentración de oxígeno, los valores obtenidos se asemejan parcialmente a los obtenidos por los otros autores. Estas diferencias pueden deberse al cobre que se introdujo en los viales de los ensayos realizados en la UC3M, ya que el cobre puede actuar como un catalizador de las reacciones de envejecimiento del papel y del aceite.

También, se han obtenido un modelo de envejecimiento en función de la humedad para una concentración de oxígeno baja y media, a partir de la evolución de las energías de activación obtenidas y de las curvas de ajuste de los valores de A obtenidas para baja y media concentración de oxígeno.

7.3 TRABAJOS FUTUROS

La aplicación trabaja con una reacción de envejecimiento de orden cero, que corresponde a la siguiente ecuación:

$$\frac{1}{DP_t} - \frac{1}{DP_0} = kt$$

Siendo

$$k = Ae^{\frac{-E_a}{RT}}$$

Sería interesante en un futuro, desarrollar la aplicación para que permita trabajar con un modelo de envejecimiento que ajuste los datos a una reacción de primer orden.

$$\frac{1}{DP_t} - \frac{1}{DP_0} = \frac{k_{10}}{k_2} (1 - e^{(-k_2 t)})$$

De esta manera se consigue un mejor ajuste de los resultados.

Realizar ensayos con diferentes tipos de papel para comprobar el efecto de un papel diferente en los valores de k y A . También sería interesante hacer ensayos con diferentes tipos de aceite, por ejemplo, con aceites vegetales ya que en los últimos años, el aspecto medioambiental ha cobrado importancia y el desarrollo de tecnologías limpias se está imponiendo actualmente.

Añadir nuevas opciones a la aplicación de una forma sencilla, ya que cada opción se ha programado en un módulo diferente. Ejemplo: evolución del contenido de humedad durante los ensayos, evolución de la vida esperada para el aislamiento celulósico con la concentración de oxígeno, etc.

Validar los resultados de las ecuaciones de envejecimiento en función de la humedad, obtenidas para baja y media concentración de oxígeno:

- Para baja concentración de oxígeno:

$$\frac{1}{DP_t} - \frac{1}{DP_0} = \left((2,066 \cdot 10^7 \cdot H^2 + 4,025 \cdot 10^8 \cdot H) e^{\frac{-(20,06 \cdot H + 37,23)}{RT}} \right) \cdot t$$

- Para media concentración de oxígeno:

$$\frac{1}{DP_t} - \frac{1}{DP_0} = \left((4,629 \cdot 10^7 \cdot H^2 - 4,34 \cdot 10^7 \cdot H + 7,193 \cdot 10^8) e^{\frac{-(20,06 \cdot H + 37,23)}{RT}} \right) \cdot t$$

Bibliografía

- [1] Flores, W. Rattá, R. Mombello, E. &Jardini, J. (Marzo de 2007). Vida de transformadores de potencia sumergidos en aceite: Situación actual. Parte I. Correlación entre la vida y la temperatura. IEEE LATIN AMERICA TRANSACTIONS, 5(1), 50-54.
- [2] IEEE Guide for loading mineral oil-immersed transformers. IEEEStd. C 57.91-1995.
- [3] IEC Loading guide for oil-immersed power transformers. IEC publication 354, 1991.
- [4] A. M. Emsley and G. C. Stevens, "Kinetics and mechanisms of the low-temperature degradation of cellulose", Cellulose, Vol. 1, pp. 26-56, 1994.
- [5] Lelekakis, N. Martin, D. &Wijaya, J. "Ageing Rate of Paper Insulation Used in Power Transformers Part 1: Oil/paper System with Low Oxygen Concentration". IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul. Vol.19, no. 6. December 2012.
- [6] Lelekakis, N. Martin, D. &Wijaya, J. "Ageing rate of paper insulation used in power transformers". Part 2: oil/paper system with medium and high oxygen concentration. IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul. Vol.19, no. 6. December 2012.
- [7] Muñoz, V. Reyes. Modelos de envejecimiento de aislamiento sólido de transformadores de potencia. Universidad Carlos III de Madrid, Escuela Politécnica superior, Departamento de Ingeniería Eléctrica.
- [8] [Http://ocw.uc3m.es/ingeniería-eléctrica/circuitos-magneticos-y-transformadores](http://ocw.uc3m.es/ingeniería-eléctrica/circuitos-magneticos-y-transformadores).
- [9] Ras Oliva, Enrique. Transformadores de Potencia, de Medida y de Protección. Universidad Politécnica de Barcelona. 7ª Edición.
- [10] Fernando, N. Diego. Cadaviz, R. Héctor. Fernando, E-I. Diego Aplicación del aceite dieléctrico de origen vegetal en transformadores eléctricos. Ing. Univ. Bogotá (Colombia), 16 (1): 201-223, enero-junio de 2012.
- [11] Transformadores de distribución. Teoría, cálculo, construcción y pruebas. Avelino Pérez Pedro.
- [12] Cigré Brochure 323 "Ageing of cellulose in mineral-oil insulated transformers" Task Force.
- [13] McNutt, W. "Insulation Thermal Life Considerations for Transformer Loading Guides". IEEE Transactions on Power Delivery, 7 (1). January 1992.
- [14] N. Lelekakis, J. Wijaya, D. Martin, D. Susa: "The Effect of Acid Accumulation in Power-Transformer Oil on the Ageing Rate of Paper Insulation" IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul. vol. 30, no. 3, pp. 19-26, 2014.

- [15] S. Ingebrigtsen, M. Dahlund, W. Hansen, D. Linhjell, and L. E. Lundgaard, "Solubility of carboxylic acids in paper (Kraft)-oil insulation systems" in 2004 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, CEIDP '04, 2004, pp. 253-257.
- [16] L. E. Lundgaard, W. Hansen, S. Ingebrigtsen, D. Linhjell, and M. Dahlund, "Aging of Kraft paper by acid catalyzed hydrolysis" in 2005 IEEE International Conference on Dielectric Liquids, ICDL 2005, 2005, pp 381-384.
- [17] Flores, W. Rattá, R. Mombello, E. &Jardini, J. (Marzo de 2007). Vida de transformadores de potencia sumergidos en aceite: Situación actual. Parte I. Correlación entre la vida y la temperatura. IEEE LATIN AMERICA TRANSACTIONS, 5(1), 50-54.
- [18] M. Emsley and G. C. Stevens, "Review of chemical indicators of degradation of cellulosic electrical paper insulation in oil-filled transformers," Science, Measurement and Technology, IEE Proceedings -, vol. 141, pp. 324-334, 1994.
- [19] L. E. Lundgaard, W. Hansen, D. Linhjell, and T. J. Painter, "Aging of oil-impregnated paper in power transformers", IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 19, pp. 230-239, 2004.
- [20] CIGRE Working Group A2.24, "Thermal performance of transformers", CIGRE Brochure No. 393, 2009.
- [21] Fraile Mora, Jesús. Máquinas Eléctricas. Servicio de publicaciones. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. 6ª Edición. 1995.
- [22] Sanz Feito; Javier. Máquinas Eléctricas. Departamento de Ingeniería Eléctrica. Universidad Carlos III de Madrid. Madrid, 2002.
- [23] Proyecto de montaje de un Centro de Transformación. Transformador. Celdas. Bylinedu
- [24] P. K. B. Hodges, "Hydraulic Fluids," Elsevier, 1996
- [25] Nynas Napthenic, "Base oil handbook," Nynas Napthenic AB, 2001
- [26] Ageing assessment of insulation paper with consideration of in-service ageing and natural ester application. A thesis submitted to The University of Manchester for the degree of PhD in the Faculty of Engineering and Physical Sciences, 2012. NORHAFIZ AZIS. School of Electrical and Electronic Engineering
- [27] Margallo, G. Isabel. Diagnóstico del consumo de vida de un transformador a través del análisis de compuestos furánicos. Universidad Carlos III de Madrid, Escuela Politécnica superior, Departamento de Ingeniería Eléctrica.

- [28] Fernando, G, G. Diego (Mayo de 2012). Determinación de coeficientes de difusión de humedad en papeles aislantes de transformador. Universidad Carlos III de Madrid, Escuela Politécnica superior, Departamento de Ingeniería Eléctrica.
- [29] Fernando, N. Diego. Cadaviz, R. Héctor. Fernando, E-I. Diego Aplicación del aceite dieléctrico de origen vegetal en transformadores eléctricos. Ing. Univ. Bogotá (Colombia), 16 (1): 201-223, enero-junio de 2012
- [30] Transformer Handbook. Business Unit Transformers. Suiza. 2004
- [31] Dormont, J.M. Cálculo y construcción de las máquinas eléctricas estáticas. Universidad Politécnica de Madrid
- [32] K. B. Liland, M. H-G. Ese, C. M. Selsbak, L. E. Lundgaard "Ageing of oil impregnated thermally upgrated papers". IEEE Int'l. Conf. Dielectric Liquids (ICDL), 1-5.
- [33] Lampe. W, Spicar. E. The oxygen-free transformer: Reduced ageing by continuous degassing. CIGRE. 1976.